

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEI TRASPORTI “LUIGI TOCCHETTI”



**DOTTORATO IN
INGEGNERIA DEI SISTEMI IDRAULICI, DI TRASPORTO E
TERRITORIALI
INDIRIZZO INFRASTRUTTURE VIARIE E SISTEMI DI TRASPORTO
XXII CICLO**

**COORDINATORE: prof.B. Montella
COORDINATORE DI INDIRIZZO: prof.R. Lamberti**

TESI DI DOTTORATO

**ANALISI E PROGETTAZIONE DELLE
POLITICHE DI PRICING IN AMBITO URBANO**

TUTOR: Prof. Ing. Luca D’Acerno

CANDIDATA: Dott. Ing. Roberta Ciccarelli

ANNO ACCADEMICO 2009 – 2010

*A Marilena e Gino, che con amore e
pazienza mi hanno sostenuto durante
questi tre anni, a Luisa, che mi è stata
accanto come una nonna, a Flaviana, che
mi ha insegnato a puntare sempre più in
alto, a Vincenzo, grazie al quale ho
superato le piccole e le grandi difficoltà di
ogni giorno, ed a Nice, che solo dall'alto
ha potuto gioire per i miei traguardi.*

INDICE

INDICE	- 3 -
INTRODUZIONE	- 4 -
1. ROAD PRICING STATO DELL'ARTE	- 7 -
1.1 CONSIDERAZIONI INTRODUTTIVE	- 7 -
1.2 ESTERNALITÀ ED IMPOSTE PIGOUVIANE	- 9 -
1.3 PEDAGGI DI EFFICIENZA	- 14 -
1.4 PEDAGGI E MARGINAL SOCIAL COST PRICING	- 25 -
1.5 PEDAGGI E VINCOLI DI CAPACITÀ	- 31 -
1.6 PROBLEMATICHE DI NATURA TEORICA	- 38 -
1.7 PROBLEMATICHE DI NATURA APPLICATIVA	- 45 -
NOTA BIBLIOGRAFICA	- 53 -
2. POLITICHE DI PRICING NEL MONDO	- 56 -
2.1 SCHEMI DI PRICING	- 56 -
2.2 ELECTRONIC ROAD PRICING DI SINGAPORE	- 59 -
2.3 TOLL RINGS IN NORVEGIA	- 62 -
2.4 CONGESTION CHARGING DI LONDRA	- 67 -
2.5 CONGESTION TAX DI STOCCOLMA	- 71 -
2.6 ECOPASS DI MILANO	- 77 -
3. MODELLO DI CALCOLO DELLE TARIFFE	- 85 -
3.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI ED OBIETTIVI DEL LAVORO DI RICERCA	- 85 -
3.2 IPOTESI DEL MODELLO	- 91 -
3.3 MODELLO DI CALCOLO DELLE TARIFFE	- 93 -
3.4 ESPlicitAZIONE DEL MODELLO NEL CASO DI ELASTICITÀ LIMITATA ALLA SCELTA MODALE	- 103 -
3.5 ALGORITMI RISOLUTIVI	- 109 -
4. APPLICAZIONI DEL MODELLO DI CALCOLO DELLE TARIFFE	- 115 -
4.1 APPLICAZIONI	- 115 -
4.2 DESCRIZIONE RETE TEST	- 116 -
4.3 RISULTATI OTTENUTI SU RETE TEST	- 121 -
4.4 DESCRIZIONE RETE REALE	- 131 -
4.5 RISULTATI SU RETE REALE	- 136 -
CONCLUSIONI	- 141 -
RINGRAZIAMENTI	- 146 -
APPENDICE	- 147 -
BIBLIOGRAFIA	- 156 -

INTRODUZIONE

“Se questo è il migliore dei mondi possibili, cosa saranno mai gli altri?”

Voltaire, Candido ovvero l'ottimismo

Il dibattito sulla tariffazione dell'uso degli spazi stradali (intesa nel senso più ampio, non solo sulla sosta ma anche sul movimento) si configura come una delle tematiche cruciali della moderna politica dei trasporti a causa degli elevati livelli di traffico che quotidianamente vengono raggiunti nelle grandi aree urbane, con tutte le inevitabili conseguenze che comportano sia in termini di mobilità che di danni ambientali. La necessità di porre un rimedio al forte squilibrio della ripartizione modale a vantaggio del sistema di trasporto privato ha determinato un nuovo orientamento della politica dei trasporti verso una mobilità più sostenibile ed ha aperto la strada all'adozione di misure, come quelle di pricing, da sempre ritenute controverse e radicali. Sebbene l'interesse della classe politica nei confronti della tariffazione stradale in ambito urbano sia piuttosto recente, da un'attenta analisi della letteratura emerge che da decenni si è sviluppato un settore della ricerca scientifica, a metà strada tra il campo dell'economia ed il campo dei trasporti, dedicato non solo alla progettazione delle politiche di pricing ma anche allo studio dei molteplici problemi connessi alla loro implementazione in ambito urbano. Nei numerosi lavori proposti viene spesso sottolineata l'esistenza di un legame tra l'efficacia delle misure di pricing e le caratteristiche della domanda e dell'offerta del sistema di trasporto in cui esse vanno applicate. Nella più recente letteratura è possibile individuare alcuni studi in cui viene valutata la possibile influenza sull'efficacia delle politiche di pricing dell'utilizzo dei proventi, derivanti dalla tariffazione, per il potenziamento del

trasporto pubblico. Prendendo spunto da tali lavori, la presente ricerca si pone i seguenti obiettivi: formulare un idoneo modello di progettazione delle tariffe, sviluppare uno strumento di calcolo per l'implementazione del modello su reti di trasporto e verificare l'efficacia di diverse politiche di pricing nonché l'effetto dell'utilizzo dei ricavi da traffico per il potenziamento del trasporto collettivo. Nel perseguire queste finalità, alla tesi di dottorato è stata data una struttura che ricalca il percorso di ricerca seguito ed è stata articolata in quattro capitoli.

Data l'ampiezza e la natura fortemente applicativa dell'argomento trattato, all'analisi dello stato dell'arte sono stati dedicati due capitoli, facendo una distinzione tra modelli di progettazione delle tariffe (primo capitolo) e *best practices* (secondo capitolo), in modo da poter fornire un quadro completo sia degli aspetti teorici che degli aspetti pratici connessi all'implementazione di politiche di pricing in ambito urbano. Nel primo capitolo è stata ripercorsa l'evoluzione del concetto di tariffazione stradale dagli anni '50 ad oggi. Poiché la moderna teoria dei pedaggi affonda le sue radici in campo economico, è stato necessario illustrare i principi dell'economia del benessere che hanno ispirato l'estensione dei criteri di efficienza allocativa dai mercati alle reti di trasporto. Sono stati, quindi, descritti alcuni dei molteplici modelli proposti per il calcolo del road pricing, ponendo scrupolosa attenzione alle numerose problematiche (sia di natura teorica che applicativa) emerse durante un'attenta analisi della più recente letteratura.

Nel secondo capitolo vengono analizzati in dettaglio alcuni degli schemi di tariffazione urbana più famosi al mondo ed in Europa (*Electronic Road Pricing* di Singapore, *Toll Rings* Norvegesi, *Congestion Charging Scheme* di Londra, *Congestion Tax* di Stoccolma, *EcoPass* di Milano). Per ciascun sistema sono state esaminate le politiche tariffarie applicate, le strategie di gestione adottate, l'inquadramento legislativo, gli eventuali problemi emersi durante l'implementazione dei provvedimenti di pricing e, dove possibile, i parametri di operatività (costi e ricavi).

Il terzo capitolo è dedicato alla formulazione di un modello di calcolo delle tariffe stradali. Del suddetto modello viene fornita prima un'accurata

descrizione delle ipotesi di base, coerentemente con gli obiettivi prefissati, quindi ne viene descritta la struttura. Il modello presentato in questo lavoro è stato formulato attraverso un problema di ottimizzazione bilivello, dove il livello inferiore corrisponde al problema di assegnazione multimodale, il livello superiore all'ottimizzazione delle tariffe. L'assegnazione multimodale costituisce il modello di simulazione del sistema di trasporto e permette di calcolare i flussi su rete per ogni modalità considerata nonché le prestazioni per ciascun elemento del sistema di offerta. Il modello di calcolo delle tariffe è stato prima presentato in una formulazione di carattere generale; successivamente, è stato esplicitato nel caso particolare di elasticità della domanda limitata al livello di scelta modale. Infine, sono stati descritti alcuni algoritmi, il cui utilizzo è reso necessario dalla complessità risolutiva del problema.

Nel quarto capitolo sono descritti i risultati ottenuti applicando il modello di calcolo delle tariffe formulato. In particolare, il modello è stato applicato, inizialmente, ad una rete test appositamente costruita, in modo da poter individuare le relazioni esistenti tra domanda, offerta, tariffe ottime ed utilizzo dei ricavi per il potenziamento del trasporto collettivo, quindi, si è verificata l'applicabilità del modello ad una rete a scala reale. Con il modello proposto possono essere calcolate tariffe riconducibili a diverse strategie di pricing; in questo lavoro di ricerca è stata posta particolare attenzione su alcune politiche cosiddette di tipo *second-best* nonché sulla politica *first-best* che impone un pedaggio su ciascun arco della rete. I risultati ottenuti sono stati presentati e commentati nel suddetto capitolo.

A conclusione della tesi sono riassunte le relazioni emerse tra l'efficacia delle politiche di pricing, la modulazione delle tariffe sulla base delle caratteristiche della domanda e dell'offerta del sistema di trasporto e l'utilizzo dei ricavi da traffico per il potenziamento del trasporto collettivo.

1. ROAD PRICING STATO DELL'ARTE

1.1 Considerazioni introduttive

Nata in campo economico nell'ambito del dibattito sulle condizioni di efficienza dei mercati, l'idea di introdurre un pagamento per l'uso degli spazi stradali in ambito urbano è stata gradualmente acquisita, sebbene con molte riserve e difficoltà, dalla politica dei trasporti ed è attualmente riconosciuta come uno degli strumenti di *Transportation Demand Management (TDM)*. La sigla TDM è comunemente utilizzata in letteratura per indicare tutte quelle strategie (programmi, progetti, best practices) che incoraggiano un uso più efficiente dei sistemi di trasporti (Litman, 2003). Tali politiche comprendono un vasto campo di misure che vanno dal potenziamento dei sistemi di trasporto alternativi all'auto (quali ad esempio il trasporto pubblico), all'introduzione di politiche di pricing, fino ad arrivare a politiche di land-use. Tra tutte le misure di TDM, quelle di pricing risultano essere le più radicali e discusse per i problemi di accettabilità sociale e politica che suscitano ed è per questo che non si è mai avuto uno sviluppo parallelo tra teoria ed implementazioni su scala reale. Nel colmare il profondo gap esistente tra la trattazione teorica e la pratica applicativa sono passati decenni e soltanto la necessità di dover porre rimedio agli elevati livelli di traffico nelle grandi aree urbane, insieme ai risultati incoraggianti ottenuti con alcune audaci implementazioni, hanno fatto superare parte delle numerose riserve che circondano le politiche di tariffazione stradale in ambito urbano. Dagli anni '50 ad oggi, vi è stato nei confronti del cosiddetto *road pricing* un forte interesse della ricerca, che ha portato alla nascita di un copioso filone

della letteratura dedicato al problema della tariffazione. La motivazione di ciò va cercata fondamentalmente nel fatto che questo argomento ha da sempre offerto numerosi spunti di riflessione. Sebbene i principi economici di base siano rimasti sempre gli stessi dagli '50 in poi, tuttavia, il problema della tariffazione stradale, soprattutto in ambito urbano, ha inglobato molte delle problematiche legate alla simulazione dei sistemi di trasporto. Ciò deriva dal fatto che, qualunque sia la metodologia utilizzata per il calcolo dei pedaggi, essa richiede sempre il supporto di un apparato di modelli in grado di descrivere la domanda di mobilità, l'offerta di trasporto e l'interazione tra domanda ed offerta. In altre parole la teoria sul road pricing si è sviluppata muovendosi parallelamente all'evoluzione della teoria dei sistemi di trasporto: infatti, se nei primi modelli di calcolo delle tariffe stradali le condizioni di equilibrio delle reti erano espresse attraverso i classici principi di Wardrop, si è passati, successivamente, a condizioni di equilibrio statico espresse attraverso problemi di programmazione lineare con e senza vincoli di capacità, teoria dei giochi di Stackelberg e Cournot-Nash, problemi di punto fisso con approccio stocastico fino ad arrivare a problemi di equilibrio dinamico. Inizialmente per il calcolo dei pedaggi si faceva riferimento alla sola rete stradale; attualmente, avendo la tariffazione in ambito urbano acquisito dignità di strumento di gestione della domanda di mobilità, le regole di buona progettazione impongono l'utilizzo di un approccio multimodale e multiutente, al fine di garantire un funzionamento efficiente dell'intero sistema dei trasporti. In letteratura è possibile individuare diversi filoni di ricerca: alcuni autori si sono dedicati allo sviluppo di modelli di calcolo dei pedaggi, altri hanno analizzato le molteplici problematiche, sia di natura modellistica che di natura applicativa, legate alla questione della tariffazione. I problemi di natura modellistica sono, ad esempio, quelli che derivano dalla possibile non unicità dei pedaggi che possono essere imposti su rete o dalla possibile non unicità del valore del tempo per tutte le classi di utenza; mentre, quelli di natura applicativa sono, legati all'accettabilità politica e sociale e all'implementazione delle politiche di

pricing su reti reali.

Nell'intento di riuscire a fornire un significativo stralcio della vasta letteratura esistente in materia di tariffazione stradale, nel seguito saranno analizzati i principi economici alla base del road pricing (paragrafo 1.2), la teoria dei tre economisti inglesi che hanno gettato le basi per i moderni modelli di calcolo dei pedaggi (paragrafo 1.3), le due metodologie attualmente utilizzate come riferimento per il calcolo delle tariffe stradali (paragrafo 1.4 ed paragrafo 1.5), alcune problematiche di natura teorica connesse alle politiche di pricing (paragrafo 1.6), nonché alcune problematica di natura applicativa connesse alla loro implementazioni su reti reali (paragrafo 1.7).

1.2 Esternalità ed imposte pigouviane

L'idea di imporre un pedaggio sull'uso degli spazi stradali nasce in campo economico. In particolare, i principi teorici alla base del road pricing vanno ricercati nella trattazione di Pigou (1920). Dall'*economia del benessere*¹ è noto che il mancato raggiungimento delle condizioni di ottimalità Paretiana è imputabile ad una serie di cause (quali le esternalità, i beni pubblici, i beni meritori, i costi di transizione e le asimmetrie informative, i regimi non concorrenziali) che determinano il fallimento dei mercati in senso microeconomico. La condizione di *ottimalità Paretiana* è caratterizzata da un'allocazione efficiente² (detta *Pareto efficiente*) delle risorse disponibili e dal fatto che non esiste, a partire da essa, nessuna altra allocazione in cui il benessere di un individuo possa aumentare senza che quello di un altro diminuisca. Un ostacolo *all'efficienza Paretiana* è determinato dalla presenza, nei processi produttivi o di sfruttamento di una risorsa, delle *esternalità* (o *effetti esterni*, in quanto espressioni di

¹ Il termine *economia del benessere* deriva dal celebre testo omonimo pubblicato da Pigou nel 1920.

² Come notato in Runhaar (2001), è possibile fare una distinzione tra *efficienza produttiva* (la produzione è realizzata al più basso costo possibile) ed *efficienza allocativa* (corrispondente alla condizione di ottimalità Paretiana).

transazioni esterne al sistema dei prezzi). Per definizione, si genera un'esternalità ogni volta che un individuo compie un'azione che abbia effetti su un altri individui, senza che questi ultimi paghino o ricevano una compensazione per tali effetti. Le esternalità possono essere negative, se consistono in un danno, o positive, se si traducono in un beneficio; in entrambi i casi si genera per un soggetto terzo un guadagno o una perdita non compensati, da cui deriva l'*incompletezza* dei mercati. Esempio tipico di esternalità negative è fornito dall'inquinamento atmosferico di una qualsiasi industria nello svolgimento delle sue attività produttive, effetto di cui risente la popolazione residente nelle vicinanze dell'industria, senza ricevere per esso alcuna compensazione. Un esempio di esternalità positiva è, invece, quello dell'attività dell'apicoltore che ha effetti positivi sul frutteto adiacente, in quanto le api aiutano la fecondazione dei fiori. Il concetto di esternalità è centrale in alcune discipline, quali ad esempio l'*economia dell'ambiente*, in cui si presentano, soprattutto, esternalità negative di tipo produttore/consumatore che comportano notevoli perdite in termini di benessere sociale.

Le esternalità derivano, fondamentalmente, dalla mancata assegnazione dei diritti di proprietà o dall'impossibilità di farlo. Infatti, se una risorsa appartiene ad un individuo, il prezzo ne rifletterà il valore per usi alternativi e la risorsa è usata efficientemente. Se, invece, una risorsa è comune (come l'ambiente o la capacità stradale) questa sarà, tipicamente, utilizzata in maniera inefficiente perché nessuno è interessato ad economizzare il suo uso. Per questo motivo, i beni pubblici possono essere considerati come casi particolari di esternalità. Esistono, in letteratura economica, due approcci per riportare un mercato in condizioni di ottimalità, anche in presenza di esternalità: un approccio che propone una soluzione volontaristica (teorema di Coase³) ed un approccio che propone

³ Da un punto di vista cronologico, la teoria di Pigou sulle esternalità è precedente al teorema di Coase, risalendo questo al 1960 e la prima al 1920. Anzi, l'analisi di Coase nasce proprio da una critica al pensiero di Pigou. In questo contesto, si è preferito esporre le idee dei due economisti in ordine inverso rispetto a quello cronologico per motivi di comodità discorsiva.

una soluzione interventista (teoria di Pigou). Secondo il *teorema di Coase* (Coase, 1960), un'esternalità può essere corretta attraverso l'introduzione dei diritti di proprietà e della possibilità di libere transizioni; l'esito efficiente sarà conseguito indipendentemente da chi possiede i diritti di proprietà, purché la risorsa appartenga a qualcuno. Questo perché, secondo Coase, esiste una tendenza naturale a raggiungere il livello ottimale di esternalità grazie alla contrattazione diretta dalle parti in causa. L'attribuzione del diritto di proprietà ad un soggetto piuttosto che ad un altro determina soltanto chi sarà a sostenere il costo dell'esternalità, ma non il risultato efficiente, che è garantito dalla semplice attribuzione del diritto stesso. Al teorema di Coase sono riconosciuti due limiti: la contrattazione tra le parti è efficace se queste sono in numero limitato; resta indeterminato il problema redistributivo, che è implicito nell'allocazione dei diritti.

Molti anni prima di Coase, Pigou (1920), invocando la politica dell'interventismo, aveva proposto, come soluzione al problema del fallimento dei mercati imputabile alla presenza di esternalità, l'intervento pubblico all'interno dei mercati stessi attraverso l'imposizione di tasse o sussidi al fine di modificare gli equilibri altrimenti non ottimali. L'osservazione da cui partiva l'economista inglese era semplicemente che l'effetto esterno di una qualunque azione che non passi per il mercato è causa di inefficienza e da qui l'intuizione di *internalizzarlo* attraverso l'intervento normativo e repressivo dell'ente pubblico con l'introduzione di imposte (caso di esternalità negative) o sussidi (caso di esternalità positive). L'esempio classico che viene riportato in letteratura economica per spiegare la teoria di Pigou è quello di un'industria che, nell'attività di produzione di un certo bene, è causa dell'emissione di agenti inquinanti. Pertanto, si considerino le curve di domanda e offerta relative alla produzione della suddetta industria; la curva di domanda riflette il beneficio marginale dell'individuo derivante dal consumo di un'unità addizionale di bene in questione (che coincide con il *beneficio marginale sociale*); la curva di offerta riflette il costo di produzione di un'unità

addizionale del bene stesso sostenuto dall'industria (*costo marginale privato*). L'equilibrio del mercato è fornito dall'intersezione della curva della domanda con la curva dell'offerta (punto di ascissa Q_m , figura 1.1). Nel costo marginale privato rientrano soltanto i costi di produzione sopportati dall'azienda, ma non i costi sopportati da terzi danneggiati dall'inquinamento; pertanto il punto di ascissa Q_m rappresenta un equilibrio di mercato *privato* ma non un equilibrio *socialmente ottimo*. La discrepanza tra i due equilibri deriva dal fatto che, a causa dell'effetto esterno dovuto alle emissioni inquinanti, il *costo marginale sociale* (costo di produzione più il costo dei danni ambientali) risulta maggiore del costo marginale privato.

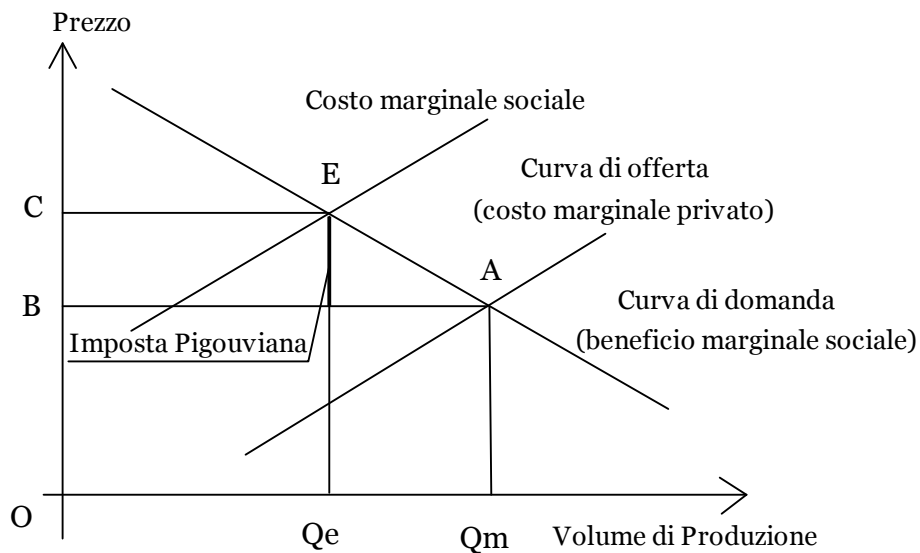


Figura 1.1: Equilibrio del mercato e condizione di efficienza economica.

Il problema dell'efficienza paretiana, in questo contesto, è come poter internalizzare il costo sociale dell'inquinamento non sostenuto dall'azienda rigenerando l'eguaglianza tra convenienza economica privata e convenienza economica sociale. Il mezzo per raggiungere l'equilibrio socialmente ottimale (punto di ascissa Q_e della figura 1.1) è, secondo Pigou, l'introduzione una tassa sulla produzione (detta *tassa pigouviana*), tale da spostare la curva di offerta privata verso quella di costo marginale

sociale; l'effetto della tassa è quello di abbassare la produzione dell'azienda ad un livello che sia socialmente accettabile. Molto semplicemente, Pigou anticipa, con la sua proposta di imposte sulle esternalità negative, il noto principio "chi inquina paga", su cui sono basate alcune moderne politiche di pricing. Una delle maggiori problematiche connesse alla definizione delle imposte pigouviane, soprattutto quando l'esternalità in questione è il danno ambientale, è quantificare nello spazio e nel tempo il danno apportato da una certa attività produttiva.

La teoria delle esternalità può essere estesa, in maniera molto naturale, ai fenomeni di congestione veicolare; in tal caso ci si trova di fronte ad un problema di allocazione di risorse, in cui si ha una risorsa scarsa, rappresentata dall'offerta di trasporto privato, alla quale ciascun automobilista accede liberamente determinando un'esternalità subita da tutti gli altri utenti della strada e dall'intera collettività. In questo caso le esternalità, dette anche *costi esterni*, comprendono i costi derivanti dalla congestione, dagli incidenti, dalle emissioni e dall'inquinamento acustico. Di questi costi, quelli relativi alla congestione ed una parte di quelli derivanti dagli incidenti (*intra-sectoral externalities*) ricadono sugli altri utenti della rete di trasporto, mentre tutti gli altri (*inter-sectoral externalities*) ricadono sull'intera collettività.

Negli anni '50, alcuni economisti inglesi, Beckmann, McGuire e Winsten (1956), hanno proposto, coerentemente con le idee di Pigou, l'introduzione di pedaggi stradali al fine di ottenere un uso efficiente delle reti di trasporto. La trattazione pionieristica sviluppata da questi economisti rappresenta ancora oggi uno dei capisaldi della teoria del road pricing ed è di seguito riportata in sintesi. Bisogna sottolineare che all'intera opera di Beckmann, McGuire e Winsten, *Studies in the Economics of Transportation*, è riconosciuta un'innovazione nel campo della modellizzazione dei sistemi di trasporto la cui influenza continua ancora oggi (Boyce et al, 2005).

1.3 Pedaggi di efficienza

Il principio da cui parte la trattazione di Beckmann et al, (1956), è che le strade sono una risorsa scarsa, quindi il loro utilizzo ottimale (*best utilization*) è un importante interesse per l'intera comunità. Da qui l'esigenza di determinare l'allocazione efficiente della capacità stradale.

Per poter definire il criterio di efficienza da applicare alle reti di trasporto stradale, è necessario effettuare una distinzione tra il caso di domanda rigida e il caso di domanda elastica. Se la domanda di trasporto da un dato punto della rete verso ogni altra destinazione è fissata, indipendentemente dalle condizioni di flusso (caso di domanda rigida), il criterio di efficienza impone la minimizzazione del costo totale degli utenti. Naturalmente, quando si parla di costo sostenuto dagli utenti della strada si fa riferimento ad un costo generalizzato, che comprende tutte le risorse che vengono impiegate per effettuare uno spostamento, quali, ad esempio, il tempo e il costo monetario. Tipicamente, ciascuna di queste voci può essere espressa attraverso funzioni convesse e crescenti del flusso veicolare.

Nel caso di domanda elastica, cioè di generazione dei flussi dipendente dalle condizioni di traffico, il principio della minimizzazione del costo totale⁴ non può essere utilizzato perché risulta indeterminato il livello di domanda in corrispondenza del quale è minimo tale costo. In tal caso è necessario definire una misura del beneficio derivante dall'uso della strada. Nella teoria economica il beneficio derivante dagli spostamenti effettuati dagli utenti viene espresso attraverso il surplus del consumatore. In generale, il surplus del consumatore misura la differenza tra la somma massima che un consumatore sarebbe disposto a pagare per avere la quantità del bene che egli richiede (detta disponibilità a pagare) e la somma che effettivamente paga nell'ottenere quella quantità. Il concetto di surplus del consumatore viene, tipicamente, spiegato attraverso la sua

⁴ Applicando come criterio del calcolo dei pedaggi la minimizzazione del costo totale anche nel caso di domanda elastica, si può giungere alla soluzione paradossale che prevede tariffe elevatissime che portano a zero la domanda stessa.

interpretazione geometrica e ciò permette anche di estendere detta misura alla totalità dei consumatori presenti sul mercato di un bene. In particolare, ritornando al caso specifico di una rete di trasporto, il surplus del consumatore è rappresentato dall'area compresa tra l'inversa della curva di domanda (la quale rappresenta la disponibilità degli utenti a pagare per usufruire dell'infrastruttura stradale) ed la linea orizzontale corrispondente al livello di costo di spostamento prevalente. In figura 1.2 il surplus del consumatore corrisponde all'area tratteggiata.

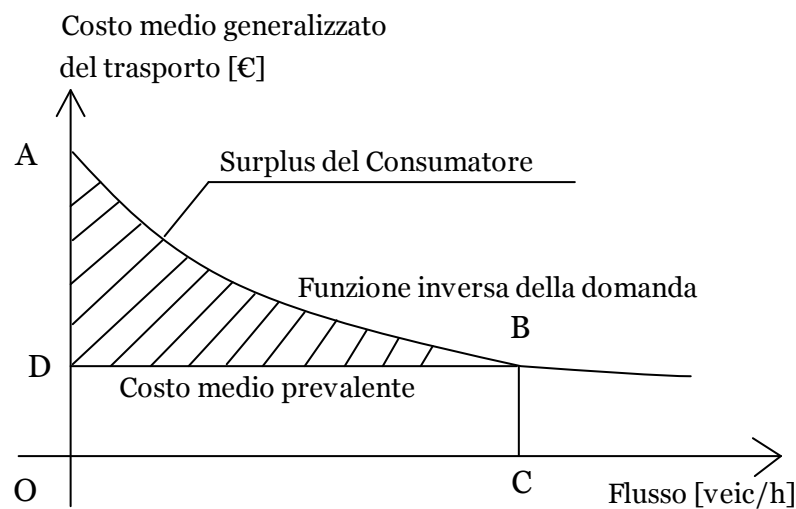


Figura 1.2: Interpretazione geometrica del surplus del consumatore.

Come è noto dall'economia, il surplus fornisce una misura esatta del benessere dei consumatori in assenza di effetti di reddito⁵.

Il principio della minimizzazione del costo in una rete può essere illustrato graficamente nel caso di una coppia origine-destinazione collegata da due strade con flusso totale costante (in letteratura tale problema è noto come problema di Pigou). Di queste due strade una sarà

⁵ L'effetto di reddito e l'effetto di sostituzione sono gli effetti che una variazione dei prezzi produce sulla retta di bilancio di un consumatore. In particolare, l'effetto di reddito consiste in una variazione della quantità domandata di un bene dovuto alla variazione di reddito reale conseguente alla variazione del prezzo del bene stesso. In altre parole, un incremento del prezzo del bene produce una riduzione del potere complessivo d'acquisto del reddito.

più corta ma di minor capacità, l'altra più lunga ma di maggior capacità. Nella figura 1.3 il segmento AB rappresenta il flusso totale che si sposta dall'origine verso la destinazione, mentre la ripartizione di tale flusso tra le due strade è indicata sullo stesso segmento AB dal punto X o X'.

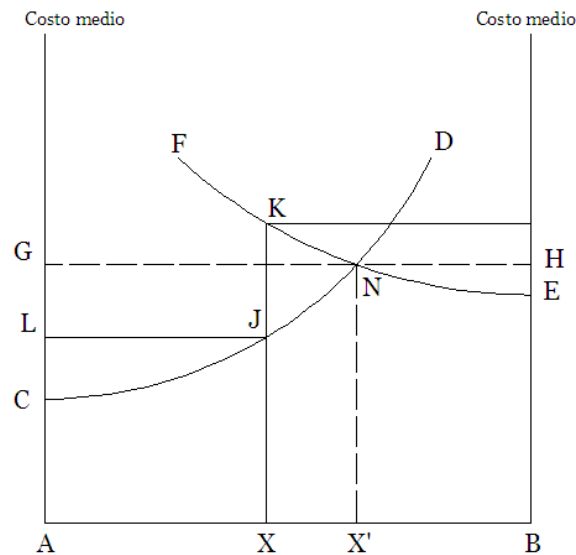


Figura 1.3: Funzioni di costo di due strade che collegano le stesse località.

Le funzioni di costo medio sulle due strade sono rappresentate dalle curve CD ed EF. Se X rappresenta la ripartizione del traffico tra le due strade, allora AX sarà il flusso su una strada e BX il flusso sull'altra, mentre AL e BM saranno i rispettivi costi medi. Il costo totale del trasporto corrispondente alla ripartizione X è, quindi, rappresentato dalla somma dell'area dei due rettangoli AXJL e BXKM. La ripartizione del flusso all'equilibrio sarà tale da determinare lo stesso costo medio sulle due strade. In questo caso, il punto X' con costi medi AG e BH rappresenta la configurazione di equilibrio; il costo totale è rappresentato dalla somma delle aree di AX'NG e BX'NH, ovvero dall'area del rettangolo ABHG.

Il problema è capire se esiste una configurazione dei flussi che determini il minimo costo totale sulla rete in esame. Si tratta, cioè, di trovare una configurazione tale che risulti minima la somma delle aree dei due rettangoli adiacenti. Si considerino, per semplicità, due funzioni di costo medio lineari (rette CD ed EF in figura 1.4); è chiaro che la successiva

dell'area che rappresenta il costo totale può essere ottenuta diminuendo la base del rettangolo che corrisponde alla bisecante con ordinata maggiore nel punto rappresentativo della ripartizione dei flussi. Il minimo valore del costo totale si verifica in corrispondenza dell'intersezione tra le due bisecanti.

Il punto X' che definisce la condizione di equilibrio dei flussi tra le due strade non corrisponde all'intersezione tra le due bisecanti (le due intersezioni, tra funzioni di costo e rette bisecanti, risultano allineate sulla stessa verticale solo nel caso di simmetria delle funzioni di costo, ossia quando le due strade sono identiche per caratteristiche geometriche). Questo significa che, in generale, la distribuzione di equilibrio dei flussi non è quella che minimizza il costo totale. La bisecante costruita per la curva di costo medio rappresenta il tasso di incremento del costo totale rispetto al flusso e prende il nome di curva di *costo marginale*⁶.

Poiché la configurazione di equilibrio dei flussi non coincide con la configurazione che rende minimo il costo totale, il sistema si trova in una condizione di inefficienza, dovuta al fatto che il criterio seguito dal singolo utente per effettuare la propria scelta è la minimizzazione del proprio costo privato e non del costo sociale dello spostamento. Un utente che si aggiunge ad una corrente veicolare produce delle esternalità per gli altri utenti (incremento del ritardo, aumento del rischio di incidenti, etc.), che non risultano essere incluse nel suo costo privato. Se in qualche modo fosse possibile spostare, a partire dalla configurazione di equilibrio, alcuni utenti dalla strada stretta a quella larga, il sistema, nel complesso ne ricaverebbe un guadagno netto. Infatti, come spiegato da Knight (1952), gli utenti che restano sulla strada stretta beneficerebbero di una riduzione dei costi conseguente alla riduzione del flusso, mentre i veicoli trasferiti sulla

⁶ Si definisce costo marginale la derivata prima del costo totale rispetto alla quantità x di bene, per cui detto $c(x)$ il costo medio per produrre una quantità unitaria del bene, il costo totale sarà $CT(x) = c(x) \cdot x$ ed il costo marginale

$$CM(x) = \frac{d}{dx} CT(x) = c(x) + x \cdot \frac{d}{dx} c(x).$$

strada larga, non incorrerebbero in alcuna perdita, perché, essendo degli utenti marginali, per loro resterebbe inalterata la relazione tra costi e benefici nel passaggio da una strada all'altra⁷.

Il problema sopra esposto può essere affrontato anche in termini di differenza tra costo marginale privato e costo marginale sociale, così come avviene tipicamente in campo economico. Ad un dato livello di traffico, il costo marginale privato è rappresentato dai costi operativi, dal tempo di viaggio, dal rischio di incidenti e da un possibile pedaggio in cui incorre un utente che si aggiunge alla corrente di traffico; il costo marginale sociale è rappresentato, invece, dal costo generalizzato che ciascuno degli utenti presenti sulla strada deve sostenere a seguito dell'aggiunta di un altro veicolo al flusso. Se il livello di flusso è talmente basso da poter trascurare l'interferenza tra i veicoli, allora i due costi coincidono. In generale, il costo marginale sociale risulta maggiore del costo marginale privato.

Se costo marginale privato e costo marginale sociale coincidessero, allora nella condizione di equilibrio si avrebbe anche la condizione di efficienza della rete di trasporto. Un modo per far percepire all'utente il costo marginale sociale è quello di imporre una tassa o un pedaggio pari alla differenza tra costo marginale sociale e costo marginale privato. Questo concetto di *tassazione differenziale*, enunciato da Pigou e anticipato nel paragrafo precedente, è alla base del *road pricing*.

Naturalmente, la trattazione esposta per il semplice caso di una coppia OD collegata da due archi è estendibile a tutte le reti di trasporto. Chiaramente, nel passare ad una rete di dimensioni reali non è più possibile condurre un'analisi grafica data la complessità del problema. In questo caso, la ricerca di quella configurazione dei flussi che determina il minimo costo totale è meno immediata e risulta necessario applicare un apparato matematico formale per la minimizzazione di una funzione di molte variabili soggette a vincoli. In particolare, il problema della

⁷ Il guadagno, in questo caso, è un guadagno netto perché il Professor Knight ha assunto che sulla strada larga un incremento dei flussi non produce alcuna riduzione della velocità media. In altre parole, la capacità della strada larga è molto elevata.

minimizzazione del costo totale del trasporto può essere formulato come un problema di programmazione non lineare con vincoli espressi da disuguaglianze, la cui risoluzione necessita dell'applicazione del teorema di Kuhn-Tucker (Kuhn e Tucker, 1951). Secondo tale teorema, data la funzione obiettivo $f(u)$ differenziabile e concava, condizione necessaria e sufficiente affinché il vettore u^o sia soluzione problema di ottimizzazione:

$$\text{Max}_u f(u) \quad \text{soggetto a } u_r \geq 0 \text{ e } \sum_r b_{sr} u_r \leq c_s \quad (1.1)$$

è l'esistenza di moltiplicatori v_s tali che:

$$v_s \geq 0 \quad \text{e } v_s = 0 \text{ se } \sum_r b_{sr} u_r^o < c_s \quad (1.2)$$

e tali che

$$\frac{\partial}{\partial u_r} \left[f(u) + \sum_s v_s \left(c_s - \sum_r b_{sr} u_r \right) \right]_{u=u^o} \begin{cases} = \\ \leq \end{cases} 0 \text{ se } u_r^o \begin{cases} > \\ = \end{cases} 0 \quad (1.3)$$

Nel caso domanda rigida, la funzione da massimizzare è l'opposto del costo totale:

$$f(x_{ij}) = -\frac{1}{2} \sum_{ij} h_{ij}(x_{ij}) \cdot x_{ij} \quad (1.4)$$

dove:

x_{ij} = flusso complessivo sull'arco ij in entrambi i sensi;

$h_{ij}(x_{ij})$ = funzione di costo dell'arco ij .

Il fattore $\frac{1}{2}$ è necessario perché ogni strada compare due volte nella somma, una volta come arco ij e una volta come arco ji . Per poter applicare il teorema di Kuhn-Tucker, la funzione obiettivo deve essere differenziabile e concava. La condizione sufficiente per la concavità della funzione obiettivo è che l'Hessiano sia semi-definito negativo, ovvero:

$$-\frac{1}{2} \frac{d^2}{dx_{ij}^2} [h_{ij}(x_{ij}) \cdot x_{ij}] \leq 0 \quad (1.5)$$

che equivale a :

$$\frac{d^2}{dx_{ij}^2} [h_{ij}(x_{ij}) \cdot x_{ij}] \geq 0 \quad (1.6)$$

Calcolando tale derivata seconda:

$$\frac{d^2}{dx_{ij}^2} [h_{ij}(x_{ij}) \cdot x_{ij}] = \frac{d^2 h_{ij}}{dx_{ij}^2} x_{ij} + 2 \frac{dh_{ij}}{dx_{ij}} \quad (1.7)$$

Il costo di trasporto lungo una strada è una funzione crescente e convessa del flusso, pertanto i termini che compaiono nella 1.2.7 sono tutti positivi. Ne consegue che la funzione obiettivo è concava in x .

I vincoli del problema sono:

$$\sum_j (x_{ij,k} - x_{ji,k}) = f_{ik} \quad (1.8)$$

$$x_{ij,k} \geq 0 \quad (1.9)$$

dove:

$x_{ij,k}$ = flusso sull'arco ij verso la destinazione k ;

$x_{ji,k}$ = flusso sull'arco ji verso la destinazione k ;

$f_{i,k}$ = domanda con origine i e destinazione k ;

Il primo è il vincolo di domanda, il secondo è il vincolo di non negatività dei flussi. Poiché la relazione $\sum_i f_{i,k} = 0$ vale sempre con il segno di

uguaglianza, mentre il segno di disuguaglianza ($>$) non può mai verificarsi, si può sostituire il segno uguale con il segno di disuguaglianza non stretta (\geq) in modo da trasformare i vincoli da equazioni a disequazioni. Indicando con $\chi_{i,k}$ i moltiplicatori e applicando il teorema di Kuhn-Tucker si ottiene la condizione:

$$\frac{\partial}{\partial x_{ij,k}} \left[-\frac{1}{2} \sum_{ij} h_{ij}(x_{ij}) \cdot x_{ij} + \sum_{i,k} \chi_{i,k} \left(\sum_j [x_{ij,k} - x_{ji,k}] - f_{i,k} \right) \right] \begin{cases} = \\ \leq \end{cases} 0 \quad (1.10)$$

se $x_{ij,k} \begin{cases} > \\ = \end{cases} 0$

In forma esplicita

$$\chi_{i,k} - \chi_{j,k} \begin{cases} = \\ \leq \end{cases} h_{ij} + h'_{ij} x_{ij} \quad \text{se } x_{ij,k} \begin{cases} > \\ = \end{cases} 0 \quad (1.11)$$

Dalle 1.2.11 si nota che i moltiplicatori sono determinati a meno di una costante additiva c_k . Questa può essere fissata in modo tale che $\chi_{k,k} = 0$. Inoltre, le relazioni 1.2.11 suggeriscono che i moltiplicatori $\chi_{i,k}$ possono essere interpretati come costi di spostamento, basati tuttavia su un prezzo del trasporto differente dal semplice costo di trasporto su una strada.

È possibile ricavare condizioni equivalenti anche nel caso di domanda elastica. Ciò che cambia è la funzione obiettivo, che non coinciderà più con l'opposto del costo totale, ma con il surplus del consumatore. Detto $x_{i,k}$ il flusso prevalente fra le località i e k , l'area OABC in figura 1.2.2, che rappresenta il beneficio lordo che gli utenti ricavano dall'effettuare lo

spostamento, è data da $\int_0^{x_{i,k}} g_{i,k}(x) dx$, dove $g_{i,k}$ è la funzione inversa di

domanda. L'area del rettangolo O CBD, che rappresenta il prevalente costo di spostamento, è uguale a $g_{i,k}(x_{i,k}) \cdot x_{i,k}$. Il beneficio netto totale, cioè il surplus, sarà:

$$\sum_{i,k} \left[\int_0^{x_{i,k}} g_{i,k}(x) dx - g_{i,k}(x_{i,k}) \cdot x_{i,k} \right] \quad (1.12)$$

Tuttavia, la somma dei costi di tutti gli spostamenti degli utenti della strada non è necessariamente identica al costo totale del trasporto. Se, per esempio, sulla rete sono imposti dei pedaggi, allora questi fanno parte dei costi di spostamento ma non devono essere inclusi nel costo totale del trasporto poiché sono una risorsa nuovamente disponibile e possono essere usati per altri scopi, come la riduzione delle tasse. Dall'altro lato, la spesa pubblica per il controllo e la manutenzione delle strade dipende dal flusso, che è variabile; se, tuttavia, si effettua un'analisi di breve periodo, tale spesa può essere ritenuta costante. Sotto queste ipotesi, si ottiene l'espressione esatta del surplus del consumatore sostituendo la somma dei costi di spostamento degli individui, $\sum_{i,k} g_{i,k}(x_{i,k}) \cdot x_{i,k}$, con $\frac{1}{2} \sum_{ij} h_{ij}(x_{ij}) \cdot x_{ij}$, la somma dei costi operativi e del costo del tempo.

$$\text{Surplus del consumatore} = \sum_{i,k} \int_0^{x_{i,k}} g_{i,k}(x) dx - \frac{1}{2} \sum_{ij} h_{ij}(x_{ij}) \cdot x_{ij} \quad (1.13)$$

In precedenza è stato dimostrato che il secondo termine è una funzione concava in x . È facile verificare che tale affermazione è valida anche per il primo termine (per la dimostrazione rigorosa si rimanda alla sezione 3.1.3 di Beckmann et al, 1956). Quindi la 1.2.13 è una funzione concava. Il suo massimo nell'ortante positivo $x_{ij,k} \geq 0$ è caratterizzato, in accordo con il teorema di Kuhn-Tucker, dalla condizione necessaria e sufficiente:

$$g_{i,k}(x_{i,k}) - g_{j,k}(x_{j,k}) - h_{ij}(x_{ij}) - h'_{ij}(x_{ij}) \cdot x_{ij} \begin{cases} = \\ \leq \end{cases} 0 \text{ se } x_{ij,k} \begin{cases} > \\ = \end{cases} 0 \quad (1.14)$$

Questa condizione può essere scritta nella forma:

$$y_{i,k} - y_{j,k} \begin{cases} = \\ \leq \end{cases} h_{ij}(x_{ij}) + h'_{ij}(x_{ij}) \cdot x_{ij} \text{ se } x_{ij} \begin{cases} > \\ = \end{cases} 0 \quad (1.15)$$

$$x_{i,k} = f_{i,k}(y_{i,k})$$

Le condizioni di efficienza suggeriscono che l'utilizzo ottimale delle infrastrutture può, almeno in teoria, essere ottenuto attraverso una configurazione di equilibrio in cui adeguate tasse o pedaggi sono imposti sulle strade congestionate. Questi pedaggi, detti “pedaggi di efficienza”, esprimono l'eccesso del costo sociale rispetto al costo privato causato da un utente addizionale. Il pedaggio da aggiungere al costo privato del trasporto è uguale all'incremento del costo privato sopportato dall'utente medio e causato da un incremento unitario del traffico, moltiplicato per il flusso totale. Aggiungendo tale pedaggio al costo privato del trasporto si ottiene il costo sociale al prevalente livello di traffico.

Se la domanda tra le varie origini e destinazioni è rigida, l'introduzione dei pedaggi produce una riduzione dei flussi derivante dal fatto che alcuni utenti si spostano su percorsi alternativi; se, invece, la domanda è elastica, l'introduzione dei pedaggi produce un doppio effetto, perché oltre alla riduzione della domanda sulle strade con pedaggi più elevati, si avrà anche una riduzione della domanda totale di trasporto su tutte le strade.

Per avere il giusto effetto, questi pedaggi dovrebbero variare in funzione delle condizioni di traffico e, quindi, del tempo. Inoltre, dovrebbero variare in funzione delle caratteristiche del veicolo, perché variano le velocità a flusso nullo e le caratteristiche di congestione.

L'accessibilità alle aree centrali delle città, dove sono tipicamente concentrate tutte le attività, è una condizione indispensabile per i mercati e per l'economia in generale. Paradossalmente, i flussi di traffico di persone e di merci, che sono il motore dell'economia stessa e delle produzioni industriali, possono diventare antieconomici nel momento in cui il costo sociale da essi prodotto diventa maggiore dei benefici da essi derivanti.

L'imposizione di un pedaggio fa aumentare il costo di trasporto di ogni individuo e può apparire, pertanto, strano che un aumento del costo di trasporto possa tradursi in un beneficio per l'utente. In effetti, preso singolarmente, l'utente sembrerebbe perdere, ma nel complesso la società ha un guadagno perché la riduzione dei flussi sulle strade congestionate produce una riduzione dei costi del trasporto e i ricavi da traffico sono, comunque, una risorsa nuovamente disponibile per la collettività. E proprio verso quest'ultimo aspetto, cioè l'utilizzo dei ricavi derivanti dall'imposizione dei pedaggi, che si stanno indirizzando molte ricerche al fine di superare i numerosi ostacoli che, come si vedrà nel seguito, si oppongono all'implementazione su reti reali di politiche di pricing.

Dati i limiti tecnologici esistenti negli anni '50, quando è stato scritto il trattato "*Studies in the Economics of Transportation*", gli autori prevedono anche la possibilità di sottoporre a pedaggio solo un numero limitato di strade e ponti, invece di tassare ogni arco della rete. In questo caso, il problema dell'efficienza può essere affrontato in termini di massimizzazione del surplus dell'utente soggetta al vincolo addizionale che su ogni strada non tariffata la differenza tra i costi per giungere agli estremi (calcolata a partire da un'origine comune, utilizzando percorsi che non necessariamente comprendono l'arco considerato) non deve essere superiore al costo medio di trasporto della strada. La soluzione di questo problema modificato dimostra che i pedaggi ottimali sulle strade tassate potrebbero risultare diversi dai pedaggi di efficienza imposti su tutte le strade. In generale, essi saranno più elevati quando le strade gratuite sono predominanti come strade di adduzione, mentre saranno più bassi quando le strade gratuite competono, come alternativa, con quelle tassate.

1.4 Pedaggi e Marginal Social Cost Pricing

I motivi per cui possono essere imposti dei pedaggi sui rami delle reti stradali sono fondamentalmente due: recuperare i costi di manutenzione e gestione, quando questi sono piuttosto elevati ed il solo finanziamento pubblico non è sufficiente; diminuire i livelli di congestione attraverso un

incremento del costo del trasporto privato, in modo da indurre gli utenti ad optare per diverse scelte di mobilità, sia in termini di percorso che di modalità. La prima forma di tassazione è piuttosto diffusa, soprattutto in ambito extraurbano, ed la si applica, tipicamente, a strade di una certa importanza, quali ad esempio le autostrade, o a particolari strutture di attraversamento, quali tunnel o ponti. La seconda forma, invece, si sta diffondendo negli ultimi anni e ha come ambito di applicazione le grandi aree urbane. Poiché per la stima di queste due categorie di pedaggio esistono teorie e algoritmi di calcolo molto differenti, per fare una distinzione, si parla nel primo caso di *road tolls*, nel secondo di *congestion tolls* (Ferrari, 2002). Da un punto di vista metodologico, i modelli di calcolo delle tariffe stradali esistenti in letteratura vengono classificati in due gruppi a seconda dell'approccio utilizzato (Bellei et al, 2002). In particolare, esiste un primo approccio che, collocandosi nella scia del lavoro di Beckmann et al. (1956), affronta il problema dei pedaggi nell'ottica economica dell'efficienza dei sistemi trasporto, ed un secondo approccio che calcola i pedaggi nel rispetto del soddisfacimento di particolari vincoli. Alcuni dei modelli di calcolo dei pedaggi appartenenti al primo gruppo vengono esaminati nel presente paragrafo; per l'analisi dei modelli del secondo gruppo si rimanda al paragrafo successivo.

L'intuizione di Beckmann et al. (1956) di imporre un pagamento per l'uso delle infrastrutture stradali, al fine di garantire un funzionamento efficiente delle reti di trasporto, è stata acquisita dalla letteratura economica ed è confluita nel ben noto principio *Marginal Social Cost Pricing* (MSCP), o più semplicemente, *Marginal Cost Pricing* (MCP). Di tale principio si è avvalsa anche la Commissione Europea per definire la linea politica che i paesi membri devono adottare nella gestione delle infrastrutture di trasporto (White Paper on Fair and Efficient Pricing for Transport Infrastructure Use, 1998). Tuttavia, i lavori di Rothengatter (2003) e Nash (2003) dimostrano come il dibattito sull'applicabilità del MSCP al campo dei trasporti sia ancora oggi piuttosto acceso. In Proost et al. (2002), invece, avvalendosi di sei casi studi, un gruppo di economisti fa

un'attenta analisi del gap esiste in Europa tra il costo del trasporto e l'*efficient pricing* suggerito dalla Commissione Europea.

Gli autori che utilizzano l'apparato teorico di Beckmann et al (1956) per la formulazione di modelli di calcolo dei pedaggi sono numerosi. Dafermos e Sparrow (1971) impostano il calcolo dei pedaggi imponendo la minimizzazione del costo totale; le condizioni di equilibrio della rete sono formulate attraverso un modello deterministico a domanda rigida in contesto monomodale e monoutente. Successivamente, Dafermos (1973) estende il suddetto modello di calcolo dei pedaggi ad una rete multiutente, proponendo due diverse politiche tassazione: pedaggi di arco e pedaggi di percorso. Anche nel modello proposto da Bergendoff et al. (1997) l'approccio utilizzato per la formulazione delle condizioni di equilibrio è ancora di tipo deterministico. In particolare, partendo dai due principi di Wardop, che esprimono rispettivamente le condizioni di *User Equilibrium* (UE) e di *System Optimum* (SO), enunciano il seguente *Pricing Toll Principle*: è possibile imporre dei pedaggi di arco tali che il nuovo problema di equilibrio dell'utente che si ottiene, modificando le funzioni di costo, ha al più una soluzione e quest'ultima è anche soluzione del problema di ottimo di sistema. I vettori β di pedaggio di arco che soddisfano il principio sopraenunciato non sono unici e sono detti *Valid Toll Vectors*. Bergendoff et al. (1997) dimostrano, quindi, che, applicando il vettore β_{MSCP} che soddisfa il MSCP⁸, si ottiene ancora un ottimo di sistema. Nell'ipotesi di mappa dei costi strettamente monotona e funzione obiettivo del problema di ottimo di sistema strettamente convessa, l'insieme ammissibile dei vettori di pedaggio è un poliedro. Lo studio di alcune proprietà, come la convessità, dell'insieme ammissibile dei pedaggi di arco viene ripreso da Hearn e Ramana (1998). Muovendo dal lavoro di Bergendoff et al. (1997), gli autori presentano una trattazione generale che consente il calcolo di qualunque tipo di pedaggio (*Toll Pricing*

⁸ Coerentemente con la teoria economica $\beta_{MSCP} = \nabla s(\bar{v})\bar{v}$, dove $s(\bar{v})$ è la mappa dei costi e \bar{v} il vettore dei flussi di arco di equilibrio.

Framework). Quindi, analizzano alcune funzioni obiettivo secondarie che permettono di scegliere uno dei possibili vettori di pedaggi. Queste funzioni obiettivo possono prevedere la minimizzazione del totale dei pedaggi imposti (MINSYS Problem), la minimizzazione del massimo pedaggio su ciascun arco (MINMAX Problem), la minimizzazione del numero di caselli (MINTB Problem) e l'annullamento del totale dei pedaggi imposti, nell'ipotesi che siano possibili anche dei sussidi (ROBINHOOD Problem). Il *Toll Pricing Framework* proposto da Hearn e Ramana (1998) viene ripreso ed applicato in Hearn et al. (2001); successivamente, viene esteso prima al caso di modelli di assegnazione a domanda elastica (General Variable Demand -GVD- model) da Yildirim e Hearn (2005) e da Heran et al. (2002), quindi al caso di sistemi di trasporto multimodali da Hamandouch et. al. (2007).

Dial (1999a, 1999b) formula un modello di ottimizzazione dei pedaggi per una rete stradale in cui Value Of Time (VOT) è una variabile aleatoria e ne fornisce l'algoritmo risolutivo. Partendo da alcune considerazioni tratte dal volume *Studies in the Economics of Transportation*, l'autore concorda con gli economisti nel ritenere che un *bets toll* per un arco è pari al valore atteso della componente sociale del suo costo marginale. Quindi, sviluppa un modello di ottimizzazione stocastica che permette di definire un *optimal system* di pedaggi da applicare alle reti di trasporto. Il modello di assegnazione proposto è un'estensione di quello presentato in un precedente lavoro (Dial 1996a, 1996b). In particolare, il problema del road pricing è formulato attraverso uno *stochastic multicommodity non linear network optimization model*, soggetto a vincoli di conservazione e non-negatività dei flussi, in cui la funzione obiettivo è il valore atteso del tempo totale speso nella rete. Tale modello di ottimizzazione equivale ad un *bicriterion user-optimal traffic assignment* in cui i pedaggi di arco sono uguali al valore medio del costo marginale. La necessità di ipotizzare il VOT come una variabile aleatoria, avente una differente distribuzione per ciascuna coppia origine-destinazione, deriva dal fatto che tale parametro è fortemente dipendente dalle condizioni socioeconomiche degli utenti e

dallo scopo dello spostamento.

Yang (1999) dimostra come il classico MSCP sia ancora applicabile nel passare dall'approccio deterministico dell'equilibrio (*Deterministic User Equilibrium-DUE*⁹) all'approccio stocastico (*Stochastic User Equilibrium-SUE*). I pedaggi di arco, secondo l'autore, non sono altro che lo strumento che permette di spostare un sistema di trasporto da una condizione di tipo SUE verso una condizione tipo System Optimum. Sebbene siano cambiate le ipotesi sul comportamento degli utenti, il modello è formulato in riferimento ad una rete monomodale monoutente con domanda rigida.

Nella letteratura recente, uno tra i più significativi modelli di calcolo dei pedaggi, basati sul principio del MSCP, è quello proposto in Bellei et al. (2002) e ripreso ed applicato in Gentile et al. (2005). Nel lavoro di Bellei et al. (2002), il calcolo dei pedaggi è formulato attraverso un *Network Design Problem*, in cui le tariffe sono le variabili di progetto e l'unico vincolo è quello di equilibrio, formulato attraverso un modello di assegnazione stocastica in contesto multimodale e multiutente con domanda elastica fino alla generazione e con Jacobiano delle funzioni di costo di arco asimmetrico. La particolarità del suddetto lavoro consiste nel dimostrare la validità e l'applicabilità della teoria dei pedaggi di efficienza di Beckmann et al. (1956) ad una rete multimodale e multiutente, in cui il comportamento degli utenti è simulato attraverso il *Trip Consumer Approach* (TPA) e le condizioni di equilibrio sono espresse attraverso un problema di punto fisso. Gli autori dimostrano che la condizione di efficienza di un sistema di trasporto, detta *System Equilibrium* (SE) ed estensione del classico concetto di System Optimum al caso stocastico, è quella caratterizzata dalla massimizzazione del benessere sociale, meglio noto in letteratura come *Social Surplus* (SS). Tale indicatore può essere calcolato come somma algebrica delle monetizzazioni degli effetti prodotti da un dato intervento di modifica del sistema di offerta (nel caso in esame

⁹ Per un approfondimento delle relazioni esistenti tra *Deterministic User Equilibrium*, *Stochastic User Equilibrium* e *System Optimum* si rimanda alla nota bibliografica a fine capitolo.

l'introduzione dei pedaggi). In generale, si ottiene sommando algebricamente il Surplus del Consumatore¹⁰, il valore monetario delle esternalità del trasporto (quali ad esempio costi degli incidenti ed costi ambientali), i costi di esercizio delle infrastrutture e dei servizi di trasporto (quali ad esempio quelli di gestione delle infrastrutture stradali e di esercizio del trasporto collettivo), i costi di realizzazione della modifica dell'offerta (quali ad esempio i costi di allestimento dei caselli per la riscossione dei pedaggi) e tutti gli eventuali proventi da tariffa, derivanti sia dalla vendita dei biglietti del collettivo che dall'applicazione di qualunque politica di road o parking pricing (Bellei et al., 2000). Gli autori dimostrano, coerentemente con il principio del MSCP, che il System Equilibrium può essere ottenuto risolvendo l'User Equilibrium che si ottiene sostituendo, nella formulazione del problema di punto fisso, le funzioni di costo di arco con le funzioni di costo marginale sociale. Poiché la condizione SE è, per definizione, un particolare UE, si può facilmente dimostrare che le condizioni di esistenza ed unicità del problema di punto fisso formulate da Cantarella (1997) continuano a mantenere la loro validità anche per il modello di equilibrio presentato da Bellei et al. (2002). Pertanto, l'esistenza di una soluzione di SE è assicurata dall'ipotesi che tutte le funzioni che definiscono il modello di offerta siano di classe C^1 ; se le funzioni di costo marginale di arco sono monotone non decrescenti, la soluzione di equilibrio è anche unica.

Nei lavori fin qui esaminati il problema del road pricing è stato affrontato da un punto di vista statico e macroscopico. L'approccio dinamico nell'analisi dei pedaggi stradali viene applicato da Lo e Szeto (2005). In particolare, gli autori osservano che, in presenza del *queue spillback phenomena*, il road pricing calcolato con il paradigma statico

¹⁰ La misura esatta della variazione dell'utilità individuale prodotta da una modifica dei prezzi può essere misurata in termini monetari valutando l'incremento di reddito EV (da *Equivalent Variation*) che induce sull'utilità indiretta lo stesso effetto della modifica dei prezzi. Bellei et al. (2000) dimostrano che, nel caso di effetto di reddito trascurabile, la EV può essere approssimata dal Surplus del Consumatore, dove quest'ultimo, nel caso di modelli di scelta probabilistici e additivi, può essere calcolato attraverso la variabile soddisfazione.

può, in alcuni casi, peggiorare piuttosto che alleviare la congestione. Quindi, utilizzando la *shockwave analysis*, studiano la validità di diverse funzioni di costo per modellizzare correttamente l'*hiper-congestion* e il road pricing. Anche in Kuwara (2007) il problema dei pedaggi è analizzato dal punto di vista dinamico. Il classico principio del MSCP, formulato in contesto statico, viene esteso al caso di *dynamic bottleneck phenomena* attraverso l'introduzione del concetto di *dynamic marginal cost*.

Una trattazione molto particolare del problema dei pedaggi è fornita da Levinson (2005), in cui viene utilizzato un approccio microscopico per l'analisi della congestione e per la valutazione del road pricing. Partendo dalla considerazione che i pedaggi possono essere utilizzati come "meccanismo cooperativo" per minimizzare il costo totale del trasporto, l'autore applica la teoria dei giochi per descrivere l'interazione tra due o più veicoli. La teoria dei giochi è ripresa anche nel recente lavoro di Dimitriou e Tsekeris (2009), in cui viene introdotto il concetto di *dynamic congestion pricing* (DCP) come naturale estensione del MSCP alle reti di trasporto dotate di sistemi di monitoraggio del traffico e di informazione all'utenza. In questo lavoro la teoria dei giochi viene applicata per simulare le relazioni tra gli utenti e le autorità che gestiscono il sistema di trasporto. Il modello presentato per il calcolo del *dynamic congestion pricing* (il cosiddetto *evolutionary game-theoretic model*) si articola in cinque sotto-modelli che descrivono il processo di scelta del percorso, il livello di domanda, il processo di acquisizione dell'informazione, il processo di propagazione del flusso e lo schema dei pedaggi.

1.5 Pedaggi e vincoli di capacità

I modelli di calcolo dei pedaggi che rientrano nel secondo gruppo, a differenza dei modelli del primo gruppo, non traggono spunto da riflessioni di natura economica ma, piuttosto, dall'osservazione delle dinamiche di funzionamento di un sistema complesso come quello dei trasporti. In questa categoria possono essere annoverati i lavori di Ferrari (1995, 1997, 1999, 2005, 2006, 2007), Larson e Patriksson (1998), Yang e

Bell (1997). In tutti i suddetti lavori, l'apparato teorico su cui è basato il calcolo dei pedaggi è quello dei modelli di equilibrio delle reti di trasporto con vincoli. Per un approfondimento di tali modelli si rimanda alla nota bibliografica.

Il filo conduttore della metodologia proposta da Ferrari è il concetto di vincoli di capacità, il cui soddisfacimento permette di assicurare il corretto funzionamento della rete. A seconda del tipo di esternalità che si vuole contenere, si possono definire due tipi di vincoli: vincoli di capacità fisica, per limitare la congestione, e vincoli di capacità ambientale, per limitare l'inquinamento. La capacità fisica di un arco stradale urbano è quel valore del flusso veicolare in corrispondenza del quale la probabilità che all'intersezione di monte dell' arco si generi una coda di lunghezza tale da invadere l'intersezione di valle diviene maggiore di un certo limite prefissato. La capacità ambientale di un arco è, invece, quel valore del flusso veicolare in corrispondenza del quale la concentrazione di una certa sostanza nociva raggiunge un valore ritenuto pericoloso. Il superamento del primo vincolo comporta fluttuazioni e instabilità del flusso (nel caso di autostrade urbane) e stop alla circolazione (nel caso di strade urbane); il superamento del secondo vincolo comporta danni ambientali.. In figura 1.6 è schematizzata la logica su cui si basano i pedaggi necessari per soddisfare i vincoli di capacità.

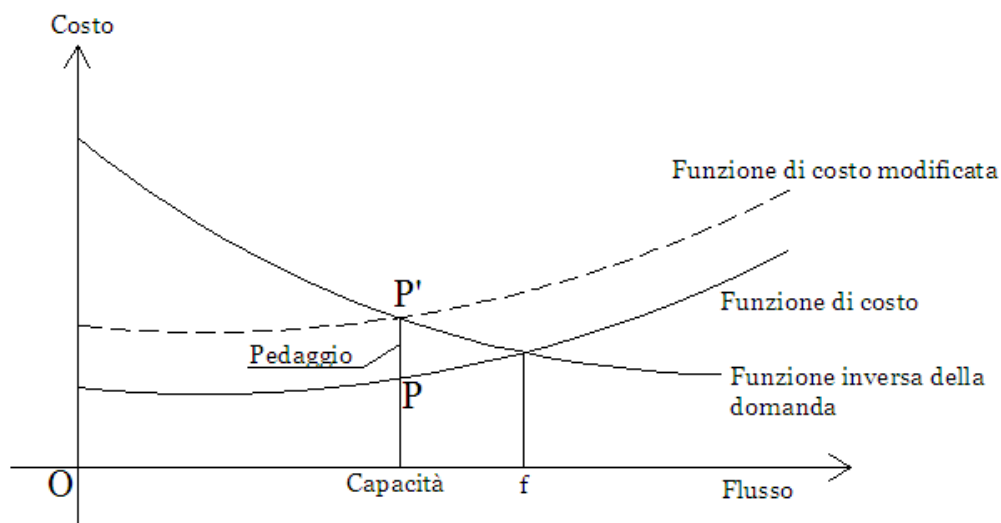


Figura 1.6: Pedaggio e capacità stradale

I vincoli precedentemente definiti rappresentano i maggiori flussi che garantiscono il buon funzionamento della rete. Essi dipendono, essenzialmente, dalle caratteristiche geometriche delle strade, dalle caratteristiche e controllo del traffico, dal rischio di instabilità e dal danno ambientale che si ritiene tollerabile. Volendo contenere sia gli effetti della congestione che dell'inquinamento, si sceglierà come vincolo di capacità il minore tra i due valori determinati. Secondo questo nuovo approccio, il pedaggio non è più lo strumento economico che permette di far percepire agli utenti della strada le esternalità da essi prodotte, ma è semplicemente il mezzo tecnico che consente di riportare il flusso al di sotto del vincolo di capacità, laddove questo risulti violato, e assicurare così il corretto funzionamento delle reti. Un'altra grande differenza tra i modelli basati sui vincoli di capacità e quelli basati sul principio MSCP è che i primi prevedono l'imposizione di pedaggi solo su alcuni rami della rete stradale (quelli su cui sono violati i vincoli) mentre i secondi, almeno in teoria, prevedono l'applicazione di un pedaggio su ogni arco della rete di trasporto.

Nella prima fase della produzione scientifica di Ferrari (1995, 1997) viene formulato un modello di equilibrio statico deterministico con domanda elastica e vincoli di capacità; l'autore dimostra che, assegnata una rete di trasporto urbano, può non esistere una configurazione di equilibrio dei flussi che soddisfi i suddetti vincoli; però, modificando opportunamente le funzioni di costo su alcuni archi della rete (ovvero imponendo dei costi aggiuntivi sotto forma di road pricing) è possibile dimostrare l'esistenza di una configurazione dei flussi tale da garantire il soddisfacimento dei vincoli. Vengono, così, forniti due diversi metodi per modificare le funzioni di costo. In particolare, in Ferrari (1995) il costo aggiuntivo per gli archi su cui avviene la violazione di un vincolo dipende dal valore limite del flusso che provoca il superamento della capacità e da una costante arbitraria, il cui valore può essere calcolato imponendo la minimizzazione del totale del road pricing imposto agli utenti. L'autore dimostra, inoltre, che i pedaggi calcolati con questo metodo risultano

nettamente più bassi di quelli che si ottengono applicando la tradizionale teoria economica, ma ciò non sorprende perché gli obiettivi delle due metodologie di calcolo sono differenti. In Ferrari (1998), dato un modello di equilibrio per una rete asimmetrica con domanda elastica e vincoli di capacità, viene dimostrata l'esistenza di una relazione lineare omogenea tra l'operatore della disuguaglianza variazionale utilizzata per esprimere il primo principio di Wardrop ed il gradiente dei vincoli. Più precisamente, se un vettore dei flussi è soluzione della suddetta disuguaglianza variazionale, esiste un insieme non negativo di moltiplicatori che verifica una relazione tra l'operatore della disuguaglianza ed il gradiente dei vincoli; tale relazione si riduce alla classica condizione di programmazione non lineare di Karusch-Kuhn-Tucker se le funzioni di costo sono separabili. Il costo addizionale da aggiungere alle funzioni di costo di arco, al fine di garantire l'esistenza di una configurazione di equilibrio della rete anche in presenza di vincoli, sarà pari ad una combinazione lineare dei suddetti moltiplicatori. In tutti i lavori successivi, Ferrari (1999, 2005, 2006, 2007), il calcolo delle tariffe è condotto attraverso la formulazione di un problema di programmazione matematica con il quale si ricerca il valore ottimo dei pedaggi in modo tale che sia massimizzata un'assegnata funzione obiettivo, il sistema di trasporto sia in equilibrio e siano soddisfatti tutti i vincoli imposti sulla rete.

Il modello proposto da Ferrari (1995) può essere visto come un caso particolare del più generale modello fornito da Larsson e Patriksson (1998). La generalità del suddetto modello deriva dal fatto che gli autori impongono dei vincoli generici attraverso delle restrizioni ai flussi di arco; tali restrizioni non sono altro che l'espressione matematica degli obiettivi fissati dall'ente che gestisce il sistema dei trasporti e coincidono con i vincoli di capacità ambientale proposti da Ferrari (1995), se uno degli scopi del pianificatore è il contenimento del danno ambientale dovuto al traffico veicolare. La scelta di imporre delle restrizioni ai flussi di arco, piuttosto che ad altre variabili, è una conseguenza naturale della facilità con cui tali grandezze possono essere osservate ed influenzate attraverso

diverse misure di controllo. Tuttavia, è possibile fare un'estensione del modello proposto da Larsson e Patriksson (1998) utilizzando come variabili dei vincoli i flussi di percorso o facendo distinzioni tra classi di utenti o veicoli. Quest'ultima estensione risulta comoda quando è necessario dover considerare differenti valori del tempo tra gli utenti del sistema. Il calcolo dei pedaggi viene formulato attraverso un problema di programmazione matematica con vincoli di equilibrio (*Mathematical Program with Equilibrium Constraints*, MPEC) che descrive la teoria dei giochi di Stackelberg. In particolare, un sistema di trasporto può essere visto come un gioco con assetto non cooperativo di Stackelberg: l'ente gestore del sistema rappresenta il *leader* che modifica la struttura dell'offerta al fine di raggiungere prefissati obiettivi; gli utenti, invece, sono i *followers* che reagiscono alle variazioni dello stato del sistema modificando il proprio comportamento nella scelta del percorso o del modo di trasporto. Gli strumenti che permettono di effettuare le modifiche all'offerta sono molteplici e possono essere interventi di aumento della capacità stradale, misure di gestione del traffico come la regolazione semaforica e dei sensi di marcia, introduzione di pedaggi su alcuni archi, introduzione di un sistema di informazione all'utenza. Chiaramente, in questo caso l'attenzione è posta sui pedaggi stradali, i quali vengono calcolati attraverso un modello di programmazione che generalizza il classico modello di equilibrio dell'utente attraverso l'introduzione di vincoli e moltiplicatori lagrangiani ad essi associati. Per ipotesi il modello di equilibrio è statico con domanda fissa, un'unica classe di utenti e costi di percorso additivi. Il problema di programmazione matematica che descrive il modello non cooperativo di Stackelberg è strutturato in due livelli: il livello superiore corrisponde alla massimizzazione di un'assegnata funzione obiettivo, che dipenderà, nel caso generale, da un vettore p , rappresentativo delle azioni del leader, e dal vettore f dei flussi di arco; il livello inferiore corrisponde all'equilibrio della rete, che costituisce uno dei vincoli del problema, insieme ai vincoli di ammissibilità dei flussi e di ammissibilità delle azioni del leader. Per quanto riguarda quest'ultima

tipologia di vincoli, le possibilità di variazione dell'offerta del sistema di trasporto da parte del gestore sono limitate a causa della presenza di vincoli di natura politica, pratica, economica ed ambientale. In letteratura, problemi di programmazione matematica come quello sopradescritto vengono utilizzati in vari contesti applicativi, quali ad esempio il *network design problem* o il *signal setting problem*; nel caso specifico del calcolo dei pedaggi stradali, si parla di *Toll Optimization Problem* (TOP). Come in Ferrari (1995), si assume che i pedaggi vengano applicati solo su quegli archi in cui avviene la violazione delle restrizioni imposte. Inoltre, per una sorta di principio di sovrapposizione degli effetti, i pedaggi possono essere decomposti nella somma dei contributi relativi a ciascuna restrizione, dove tali contributi sono misurati in termini di derivata del corrispondente vincolo. In altre parole, i pedaggi possono essere espressi come combinazioni lineari delle derivate dei vincoli attraverso dei moltiplicatori β . Bisogna notare, tuttavia, che sebbene la soluzione del problema formulato sia unica in termini di flusso di arco, questa proprietà non vale per i moltiplicatori β e, quindi, per i pedaggi di arco. Il problema della non unicità dei pedaggi può essere risolto imponendo una seconda funzione obiettivo che può esprimere, ad esempio, la minimizzazione dei pedaggi totali imposti agli utenti o la minimizzazione dei costi di implementazione della politica diricing.

Il punto di partenza dell'analisi condotta da Yang e Bell (1997) è il lavoro di Ferrari (1995), in cui si dimostra che, modificando opportunamente le funzioni di costo di alcuni archi, è possibile garantire l'esistenza di una configurazione di equilibrio della rete che soddisfa i vincoli di capacità. In contrasto con tale teoria, i due autori dimostrano, invece, che può esistere una soluzione dell'equilibrio domanda-offerta con code. Infatti, quando la domanda è abbastanza elevata da causare congestione e formazione di code, il ritardo in coda sugli archi saturi e, quindi, il costo del trasporto, aumentano provocando una riduzione della domanda di trasporto effettiva. Alla fine il sistema raggiunge una nuova configurazione di equilibrio caratterizzata dalla presenza di code. Poiché il

ritardo in coda rappresenta una perdita di risorse in termini di tempo, è desiderabile cercare una configurazione di pedaggi tale da rimuovere la suddetta coda. Questa rimozione può essere ottenuta imponendo semplicemente sugli archi una tariffa che sia pari all'equivalente monetario del ritardo in coda. Tuttavia, mantenere i flussi al di sotto della capacità degli archi può non bastare perché i veicoli che utilizzano le strade urbane sono causa, oltre che di ritardi, anche di inquinamento atmosferico ed acustico nonché fonte di pericolo per le cosiddette utenze deboli (pedoni). Da qui la necessità di utilizzare vincoli di capacità ambientale, coerentemente con la teoria di Ferrari. Ma la metodologia utilizzata da quest'ultimo differisce da quella di Yang e Bell (1997) perché, mentre Ferrari (1995) propone per il calcolo dei pedaggi un approccio euristico, i due autori propongono un approccio di programmazione matematica. Nello specifico, dimostrano che una particolare configurazione dei pedaggi, tale da soddisfare i vincoli di capacità ambientale, può essere ottenuta con un modello di equilibrio della rete con domanda elastica e con code e, poiché la soluzione del problema in termini di tariffe generalmente non è unica, forniscono anche un criterio per poter scegliere fra tutte le possibili soluzioni i *best tolls*. Il modello di equilibrio formulato consiste in un'estensione della formulazione standard dell'equilibrio con domanda elastica di Sheffy (1985), ottenuta aggiungendo ai tradizionali vincoli di domanda, di conservazione e di non negatività dei flussi anche i vincoli di capacità ambientale. Il ritardo in coda all'equilibrio non è altro che il moltiplicatore Lagrangiano associato al vincolo di capacità. Mentre la linearità e la convessità dei vincoli e la convessità della funzione obiettivo garantiscono l'esistenza di una soluzione di equilibrio, affinché il ritardo in coda sia unico, è necessario e sufficiente che tutti i vincoli di capacità sui rami siano linearmente indipendenti (Bell, 1995). Il pedaggio da imporre non è altro che l'equivalente monetario del ritardo e, se si assume il valore del tempo uguale per tutti gli utenti, l'introduzione del road pricing non produrrà alcuna perdita perché si tratta di una semplice sostituzione con il tempo perso in coda (Evans, 1992). Chiaramente,

poiché i vincoli di capacità ambientale sono più bassi dei vincoli di capacità fisica, se si impone il loro rispetto potrebbero non formarsi code. Nel lavoro di Yang e Bell viene affrontato anche il problema della non unicità dei pedaggi, già notato da Larsson e Patriksson (1995). In particolare, poiché la configurazione dei pedaggi che permette di ridurre i flussi a livelli desiderati non è unica, si può considerare una seconda funzione obiettivo per scegliere i *best tolls* fra tutte le possibili soluzioni. Le condizioni che possono essere imposte sono diverse, nel senso che si possono usare come funzioni obiettivo la domanda di viaggio totale effettiva, il surplus del consumatore o i ricavi derivanti dai pedaggi. La funzione obiettivo utilizzata per la soluzione del problema di non unicità influenza il valore dei pedaggi ottimi. In generale, conviene utilizzare come funzione obiettivo la domanda di viaggio totale effettiva quando lo scopo del road pricing è contenere la domanda; il surplus degli utenti quando il road pricing è usato come strumento per limitare la congestione e i danni ambientali; i ricavi quando il road pricing è usato come forma di finanziamento per infrastrutture. Naturalmente, è possibile utilizzare anche una combinazione delle tre funzioni obiettivo se si vuole realizzare un programma multiobiettivo.

1.6 Problematiche di natura teorica

Nell'applicare i modelli di calcolo dei pedaggi descritti nei paragrafi precedenti, si incorre in alcune problematiche di *natura teorica*, che possono discendere dalle proprietà analitiche dei modelli stessi (come la non unicità dei pedaggi) o dalla complessità dei fenomeni che si vogliono catturare (come la questione delle soluzioni *first-best* e *second-best* o la non unicità del VOT).

Come già sottolineato in precedenza, il problema della non unicità dei pedaggi, che possono garantire il funzionamento efficiente delle reti di trasporto, è stato analizzato da numerosi autori (Bergendoff et al., 1997; Hearn e Ramana, 1998; Larsson e Patriksson, 1998; Yang e Bell, 1997). Una possibile soluzione è rappresentata dall'introduzione di una seconda

funzione obiettivo. Ad esempio, Hearn e Ramana (1998) aveva ipotizzato diverse funzioni obiettivo secondarie, che possono comportare la minimizzazione del totale dei pedaggi imposti (MINSYS Problem), la minimizzazione del massimo pedaggio su ciascun arco (MINMAX Problem), la minimizzazione del numero di caselli (MINTB Problem) e l'annullamento del totale dei pedaggi imposti, nell'ipotesi che siano possibili anche dei sussidi (ROBINHOOD Problem). Anche Dial (1999c, 2000) osserva che i pedaggi in grado di spostare l'equilibrio di una rete stradale da una condizione *user optimal* verso una condizione *system optimal* non sono unici e, pertanto, propone di introdurre, in alternativa ai Marginal Cost (MC) tolls, i Minimal-Revenue (MR) tolls. Tali pedaggi sono quelli che, oltre a garantire il minimo costo totale, comportano anche il minor aggravio per gli utenti della rete, permettendo la minimizzazione dei ricavi. L'autore fornisce, inoltre, un efficiente algoritmo che permette la determinazione dei suddetti pedaggi.

Si è in precedenza visto che i sistemi di trasporto sono affetti da inefficienze allocative derivanti, fondamentalmente, dall'inadeguatezza dei prezzi. In particolare, il costo, soprattutto in campo stradale, non riflette la scarsità delle risorse impiegate; ciò comporta un eccesso di domanda ed una distorsione nella competizione intermodale, perché le modalità alternative al trasporto privato (come il trasporto pubblico o il trasporto ferroviario) sono sottoutilizzate. Un metodo per ripristinare l'efficienza è quello di imporre dei pedaggi, in modo che gli utenti percepiscano non più il costo marginale privato bensì il costo marginale sociale. In letteratura economica, una condizione in cui tutti i prezzi sono uguali ai costi marginali sociali è detta *first-best condition* (Rouwendal e Veroef, 2006). Una condizione di questo tipo, tuttavia, è soltanto un costrutto teorico e difficilmente può essere raggiunta in un mercato reale e, quindi, nel campo dei trasporti. Infatti, il principio del MSCP è basato sulle seguenti ipotesi: gli utenti hanno una completa e perfetta informazione su tutti i costi (compresi quelli esterni) e i benefici derivanti dall'utilizzo della strada; gli utenti sono completamente omogenei e differiscono solo per la

disponibilità a pagare per l'uso delle infrastrutture; la curva di domanda è stabile nel tempo, cosicché risulta valido l'approccio statico; il sistema economico che contiene la rete di trasporto si trova a sua volta in una condizione di efficienza e non risente né di effetti esterni né di altra forma di fallimento o distorsione. Inoltre, come notato da Veroef (2000), poiché un pedaggio first-best deve riflettere tutti i costi esterni prodotti dagli utenti (congestione, inquinamento acustico e atmosferico, etc.), dovrebbe essere differenziato in base al tipo e alle condizioni del veicolo, ai chilometri percorsi, al tempo impiegato per percorrerli, al luogo in cui viene effettuato lo spostamento, al percorso scelto e allo stile di guida. E' evidente come tutto ciò renda impossibile il raggiungimento di una condizione di tipo *first-best*. Pertanto, quelle che si adottano nella realtà sono delle soluzioni sub-ottime, comunemente dette *second-best solution*. Rientrano in questa categoria tutte le politiche di tariffazione attualmente implementate nelle aree urbane, quali le strategie che impongono il pagamento di pedaggi su alcuni archi della rete o misure di cordon e parking pricing. La metodologia di progettazione delle tariffe second-best è la stessa che si utilizza per quelle first-best e prevede, pertanto, la formulazione di un problema di ottimizzazione, in cui la funzione obiettivo è il benessere sociale. L'unica differenza è rappresentata dal numero di variabili di progetto che, nel caso delle politiche second-best, tipicamente è più basso, in quanto i pedaggi sono applicati solo su alcuni archi e non su tutta la rete. In letteratura, molteplici sono gli autori, soprattutto economisti, che hanno studiato il problema delle soluzioni di tipo second-best. In Veroef et al. (1996b) viene esaminata l'efficienza di alcune misure second-best nel caso di una semplice rete bi-arco, in cui gli utenti possono scegliere tra una strada gratuita ed una strada a pagamento. In Veroef et al. (1996a) la precedente analisi sull'efficienza dei second-best tolls è estesa ad una rete in cui è presente un sistema di informazione all'utenza ed il fenomeno della congestione è affrontato con approccio stocastico. Successivamente, Veroef (2002a,b) formalizza il calcolo dei pedaggi second-best per il caso generale di una rete a domanda elastica in

condizioni di equilibrio statico e fornisce un algoritmo risolutivo per la soluzione del suddetto problema. La questione del second-best road pricing in una rete a domanda elastica è stato affrontato anche da Zhang e Ge (2004). Gli autori, sfruttando uno studio relativo al problema dell'equilibrio di una rete in presenza di road pricing presentato in un precedente lavoro (Zhang e Ge, 2000), formulano un modello di programmazione matematica per il calcolo delle tariffe. Lawphongpanich e Hearn (2004) si sono occupati del problema dei second-best tolls sia nel caso di domanda fissa che in quello di domanda elastica. In particolare, hanno impostato il calcolo delle tariffe come un problema di programmazione non lineare con vincoli di equilibrio e hanno sviluppato un algoritmo che consente un'agevole implementazione del modello. Nel recente lavoro di Ekström et al. (2009) la progettazione dei pedaggi second-best viene impostata sia in termini di *toll level* (livello tariffario) che di *toll position* (scelta delle infrastrutture da tassare e posizionamento delle stazioni). Gli autori formulano un problema di ottimizzazione bi-livello, in cui il livello superiore corrisponde alla massimizzazione del social surplus, il livello inferiore alla soluzione dell'equilibrio della rete con domanda elastica. Data la complessità analitica del problema propongono, inoltre, un algoritmo meta-euristico per la sua risoluzione. Infine, Koh et al. (2009) presentano un modello che permette di ottimizzare contemporaneamente i second-best tolls e la capacità stradale, proponendo per la sua soluzione un'estensione del *Cutting Constraint Algorithm* (CCA) sviluppato da Lawphongpanich e Hearn (2004).

Un'altra problematica relativa alle politiche di pricing, che da sempre ha suscitato un grande interesse dei ricercatori, è la questione dell'eterogeneità dell'utenza, soprattutto rispetto al valore del tempo. Infatti, la formulazione originale del MSCP è basata sull'ipotesi semplificativa di utenti omogenei, dotati pertanto dello stesso VOT. Già Beckmann et al. (1956) si erano posti il problema della variabilità del valore del tempo tra gli utenti, nel caso molto semplice di una rete bi-arco. Infatti, alla fine del capitolo quarto dedicato ai pedaggi di efficienza, hanno

dimostrato la validità della loro trattazione anche in presenza di VOT variabile tra gli utenti con legge generica; in altre parole, è ancora possibile ottenere un incremento del benessere totale imponendo un pedaggio su una delle due strade. Come visto precedentemente, tale questione era stata notata anche da Dial (1999a, 1999b). Infatti, nella sua originale trattazione, l'autore propone un modello di ottimizzazione dei pedaggi per una rete stradale in cui il Value Of Time è una variabile stocastica. L'idea di ipotizzare il VOT come una variabile aleatoria, avente una differente distribuzione per ciascuna coppia origine-destinazione, è giustificata dalla necessità di dover cogliere l'estrema variabilità del suddetto parametro. Il pedaggio ottimo per ciascun arco, in questo caso, è pari al valore atteso della componente sociale del costo marginale. Arnott e Krauss (1998) osservano che, sebbene il loro comportamento possa essere identico nell'utilizzare una risorsa, esistono delle differenze tra gli utenti che non sono facilmente osservabili. Data l'impossibilità di poter cogliere questa complessa differenziazione, il pedaggio deve essere *anonymous*, cioè uguale per tutti. L'importanza di considerare il VOT non uguale per tutti ma variabile viene sottolineata da Yang et al. (2002). Gli autori formulano un modello di equilibrio per una rete multiutente per prevedere i flussi ed i ricavi nel caso particolare di una strada sottoposta a pedaggi e gestita da privati. Analizzano, quindi, la discrepanza esistente tra i risultati ottenuti applicando un modello standard di equilibrio con un unico valore del tempo ed il modello da loro proposto. Dall'analisi condotta emerge che l'ipotesi di utenti omogenei può portare ad un'errata stima dei pedaggi e, di conseguenza, ad un'errata previsione dei profitti della compagnia che gestisce l'infrastruttura. In un successivo lavoro, Yang e Huang (2004) si pongono il problema del calcolo di un unico *uniform link toll* (cioè di un pedaggio che sia uguale per tutti gli utenti, anche se questi hanno differenti valori del tempo) che sia in grado di garantire il raggiungimento del System Optimum Equilibrium. Presentano, quindi, un multi-class multi-

criterio traffic network equilibrium model¹¹ ed ipotizzano l'esistenza di un insieme discreto di VOTs per diverse classi di utenza. Applicando il classico principio del MSCP, arrivano alla conclusione, simile a quella di Dial (1999a,b), che il pedaggio su ciascun arco deve essere uguale all'esternalità espressa in termini di ritardo e moltiplicata per la media aritmetica dei VOTs degli utenti che utilizzano l'arco. Il problema dell'esistenza di un *anonymous link toll* viene ripreso ed affrontato in un recente lavoro di Yang e Zhang (2008). Un'estensione rigorosa del MSCP ad una rete multiutente richiederebbe una differenziazione del pedaggio imposto su uno stesso arco in base agli utenti che lo attraversano. Osservando l'irrealizzabilità di una tale soluzione, studiano l'esistenza di pedaggi di arco uguali per l'intera utenza attraverso l'apparato teorico della programmazione lineare. Simulando l'equilibrio della rete attraverso l'assetto cooperativo di Cornout-Nash, dimostrano l'esistenza di pedaggi di arco non negativi, uguali per tutti gli utenti, in grado di garantire il raggiungimento del *Wardropian System Optimum*.

Al di là di tutte possibili dissertazioni di natura puramente matematica che possono essere fatte, come quelle sopraesposte, bisogna notare che, sebbene il VOT sia un parametro introdotto nei modelli di equilibrio per cogliere meglio il reale funzionamento dei sistemi di trasporto, resta pur sempre un costrutto teorico, che riesce solo in parte a rappresentare la complessità del comportamento umano nei meccanismi di scelta. Inoltre, va sottolineato che, molto più importante del calcolo esatto dei pedaggi che riescono a garantire l'efficienza nei contesti multiutente, è l'effetto che i suddetti pedaggi provocano sulle diverse classi di utenza. A tal proposito, Ferrari (2007) osserva che le condizioni finanziarie degli abitanti di una città sono distribuite in un spettro molto ampio; da ciò derivano disponibilità a pagare molto diverse e, quindi, valori monetari attribuiti ai tempi di viaggio altrettanto diversi. Nell'ipotesi di domanda elastica,

¹¹ Gli stessi autori spiegano che, sebbene in letteratura l'aggettivo multi-class venga utilizzato in riferimento a reti in cui si considerano diverse classi di veicoli, ciascuna con una propria funzione di costo, in questo caso l'aggettivo è utilizzato in riferimento alla presenza di diverse classi di utenti e, quindi, equivalente di multiutente.

l'imposizione del road pricing in un'area urbana costringe le persone con reddito più basso a ridurre o eliminare del tutto l'uso dell'automobile, optando, quando è possibile, per un diverso modo di trasporto. Da ciò deriva una riduzione della domanda di trasporto privato e, quindi, una riduzione della congestione e dei tempi di viaggio. Tale riduzione spinge un certo numero di persone, dotate di reddito più alto, che in precedenza rinunciavano a viaggiare per l'elevata congestione, a spostarsi con l'auto privata, in quanto per esse l'onere del pedaggio è più che compensato dalla diminuzione del tempo di viaggio. Si verifica, quindi, che la diminuzione della domanda di trasporto degli utenti a basso reddito è, almeno in parte, compensata da un aumento della domanda degli utenti che hanno maggiori risorse finanziarie. In altre parole, gli utenti con elevato valore del tempo (ovvero con elevato reddito) ricevono un guadagno di benessere dall'introduzione delle politiche di pricing, perché l'aumento del costo monetario risulta essere più che compensato dalla riduzione della congestione indotta dalla politica tariffaria; invece, quelli con basso valore del tempo (ovvero basso reddito), essendo un'utenza marginale, subiranno una perdita di benessere nel passare, a seguito della tariffazione, dal trasporto privato a quello collettivo, il cui costo generalizzato risulta essere superiore. Stabilito, quindi, che le politiche di pricing tendono a colpire gli utenti con reddito più basso, l'autore propone di utilizzare una parte dei ricavi derivanti dalla tariffazione del trasporto privato per potenziare il trasporto pubblico. Infatti, dimostra che, pur non riuscendo ad evitare che il road pricing dia luogo ad una modifica della ripartizione della domanda di trasporto fra diversi gruppi sociali a svantaggio di quelli con basso reddito, il miglioramento delle prestazioni del trasporto pubblico riesce ad attenuare in parte questo inconveniente. Dello stesso parere sono Rouwendal e Verhoef (2006). Infatti, anche i due economisti sostengono che gli utenti più ricchi siano quelli che possono trarre il maggior guadagno dall'introduzione del road pricing. Tale circostanza incide negativamente sul problema dell'accettabilità, di cui si parlerà nel seguente paragrafo. Dato che l'introduzione del pedaggio può produrre effetti

negativi per alcuni utenti, sebbene nel complesso il funzionamento del sistema migliori, la possibilità di produrre un beneficio netto per tutti dipende unicamente dal modo in cui vengono utilizzati i ricavi.

1.7 Problematiche di natura applicativa

Come sottolineato in precedenza, per anni la teoria e la pratica, in materia di tariffazione stradale, si sono sviluppate in maniera asincrona, comportando un forte ritardo della pratica applicativa rispetto all'avanzamento teorico raggiunto nel campo della ricerca. Una delle principali cause del suddetto gap va ricercata nelle diverse problematiche, di *natura applicativa*, derivanti dall'implementazione delle politiche pricing nei sistemi di trasporto reali. Tra le suddette problematiche, sicuramente la più discussa in letteratura economica è quella dell'accettabilità politica e sociale, seguita dalle questioni di giustizia ed equità legate all'utilizzo del road pricing in ambito urbano. A queste bisogna aggiungere varie osservazioni riguardo alla tecnica con cui si implementano le strategie scelte, nonché l'ancor più delicato problema dell'utilizzo dei ricavi.

Tipicamente, l'ostilità nei confronti delle politiche di pricing si sviluppa su due fronti: infatti, è comunemente riconosciuto che i pedaggi non trovano né l'approvazione dell'opinione pubblica, in quanto vengono interpretati come ulteriore tassa che si aggiunge a quelle già esistenti, né della classe politica, preoccupata dalle conseguenze negative che essi possono avere sul consenso degli elettori. Tuttavia, come si vedrà nel capitolo successivo, l'esperienza della *Congestion Charging* di Londra dimostra ampiamente come il successo di una misura di pricing ben progettata possa trasformarsi in un successo politico (il sindaco Livingston, autore dell'introduzione del road pricing nel centro Londinese, è stato, infatti, rieletto). Molti lavori presenti in letteratura sul problema dell'accettabilità sono il risultato di campagne di indagini o casi studi condotti in ben precise realtà territoriali. In Giuliano (1992) e in Emmerink et al. (1995) viene condotta un'attenta analisi delle barriere che

si oppongono all'applicazione del congestion pricing, rispettivamente, negli Stati Uniti ed in Olanda. Ison (2000) affronta, invece, lo stesso problema relativamente al Regno Unito. L'autore nota che l'accettabilità da parte dei decisori politici è la maggiore causa dell'esigua diffusione delle strategie di pricing in ambito urbano, sebbene venga loro riconosciuta una notevole efficacia come strumento di gestione della domanda di mobilità. Analizzando i dati di un'indagine condotta negli anni '90 (molti anni prima dell'introduzione della *Congestion Charging*), conclude che la classe dirigente, contrariamente agli economisti, ritiene più efficaci politiche di potenziamento del trasporto pubblico e di *land-use*, mentre i cittadini preferiscono politiche che migliorano non solo la rete del trasporto collettivo ma anche quella pedonale e ciclabile. Ad un risultato simile giungono anche Thorpe et al. (2000) analizzando i risultati ottenuti con uno studio condotto su due città inglesi (Cambridge e Newcastle). Lo scopo del suddetto studio era analizzare il grado di accettabilità mostrato dai cittadini nei confronti di quattro misure TDM (potenziamento del trasporto pubblico, road pricing, parking pricing, zone a traffico limitato). In linea con i risultati di Ison (2000), gli autori concordano nel ritenere il potenziamento del trasporto pubblico la misura di gestione della domanda di mobilità con più alto tasso di consenso popolare. Jakobsson et al. (2000) analizzano, invece, le cause dell'ostilità nei confronti delle politiche di pricing della classe di utenti direttamente dalla tariffazione: gli automobilisti. Basandosi sui dati ottenuti con una campagna di interviste che ha coinvolto più di 500 automobilisti svedesi, concludono che la scarsa accettabilità deriva dal fatto che il road pricing è percepito come un incremento di costo ingiusto che limita la libertà degli utenti della strada. Anche Schade e Schlag (2003) si concentrano sul punto di vista degli automobilisti, utilizzando i dati raccolti con una campagna di interviste condotta in quattro città europee (Atene, Como, Dresda, Oslo) nell'ambito del progetto di ricerca, finanziato dalla Commissione Europea, AFFORD (Acceptability of Fiscal and Financial Measures & Organisational Requirements for Demand Management). Il risultato a cui arrivano è che

le caratteristiche socio-economiche giocano un ruolo fondamentale nel modo in cui gli automobilisti percepiscono e reagiscono all'introduzione di una politica di pricing. Osservazioni molto interessanti sono quelle mosse da Oberholzer-Gee e Weck-Hannemann (2002). In particolare, gli autori ritengono che i motivi per cui i cittadini sono pochi predisposti nei confronti del road pricing sono fondamentalmente due: il primo è che gli utenti hanno una scarsa disponibilità a pagare un costo derivante dal meccanismo allocativo di una risorsa scarsa; il secondo è che raramente le politiche di pricing vengono inserite in modo adeguato nei programmi politici tesi alla salvaguardia ambientale. In altre parole, Oberholzer-Gee e Weck-Hannemann (2002) evidenziano come alla base dell'accettabilità vi sia anche una non corretta programmazione politica, in quanto è ormai riconosciuta una crescente sensibilità ambientale da parte dei cittadini. L'analisi condotta da Ubbles e Veroef (2005) affronta contemporaneamente il problema dell'accettabilità di alcune misure di pricing e dell'utilizzo dei ricavi. Utilizzando i dati di un'indagine condotta tra i pendolari olandesi, osservano che la reazione degli utenti all'introduzione di una politica di pricing è fortemente dipendente dalle caratteristiche personali. In generale, il consenso tende ad aumentare al crescere del grado di istruzione e, naturalmente, del valore del tempo. Sul fronte dell'utilizzo dei ricavi derivanti dalla tariffazione del trasporto privato, gli autori riscontrano una netta preferenza per l'abolizione della tassa di proprietà sulle auto.

Altre due questioni che camminano di pari passo con l'accettabilità delle politiche di pricing sono quelle dell'equità e della giustizia. Un'originale trattazione è quella fornita da Blazer e Niskanen (2005), in cui i due autori hanno provato a cambiare quello che è il tradizionale punto di vista degli economisti, suggerendo l'applicazione di un pedaggio comunque tale da far pagare all'utente le esternalità prodotte. La riflessione da cui partono è che, sebbene un utente che si aggiunge ad una corrente veicolare imponga delle esternalità agli altri già presenti sulla strada, è altrettanto vero egli è sua volta vittima delle esternalità prodotte dagli altri. Sulla base di questa

osservazione, propongono un metodo per calcolare dei *just tolls*, secondo la definizione di giustizia da loro adottata. Propongono, inoltre, una strategia di pricing combinata con il *car-pooling*, ipotizzando pedaggi differenziati in base al numero di occupanti dei veicoli.

Nell'implementazione delle politiche di pricing particolare attenzione va posta non solo alla scelta delle misure da adottare ma anche alla tecnica utilizzata per applicarle. Più precisamente, le implementazioni di tipo *big-bang* (cioè quelle che prevedono l'applicazione tout court di una strategia) possono risultare poco realistiche, soprattutto se si adottano politiche di pricing radicali, che generano numerosi problemi di accettabilità. Per guadagnare l'approvazione dell'opinione pubblica è necessario far sì che gli utenti si abituino gradualmente alle nuove politiche di tariffazione. Pertanto, con i cosiddetti *implementation paths*, l'implementazione delle misure avviene per fasi graduali, partendo da schemi semplici e più familiari agli utenti, per arrivare a schemi sempre più complessi. In questo modo, l'utenza può recepire le politiche di pricing con minor ostilità ed ha la possibilità di apprezzare ad ogni step l'incremento di benessere derivante dalla strategia adottata. Il principio con cui si progettano i percorsi di implementazione è quello dell'efficienza economica, pertanto la direzione che il percorso deve seguire ad ogni fase, nonché le politiche da implementare, vengono definite in modo tale da determinare il massimo incremento di benessere sociale. I percorsi di implementazione permettono, inoltre, di affrontare il discorso dell'accettabilità su un orizzonte temporale molto ampio, che può arrivare a coprire anche qualche decina di anni. L'importanza di adottare i percorsi di implementazione per poter superare alcune delle problematiche connesse all'introduzione delle politiche di pricing in ambito urbano è sottolineato dal grande interesse mostrato nei confronti di questo argomento dalla Commissione Europea attraverso il finanziamento del progetto MC-ICAM (Implementation of Marginal Cost Pricing in Transport –Integrated Conceptual and Applied Model Analysis). Uno degli obiettivi di tale progetto era lo studio di ipotetici percorsi di implementazione per alcune

città europee, come Parigi (de Palma e Lindsey, 2006) e Oslo (Vold, 2006) con l'ausilio di avanzati modelli di simulazione dei sistemi trasporto. de Palma, Lindsey e Proost (2006) sottolineano che un percorso di implementazione non progredisce necessariamente in maniera monotona, nel senso che le tariffe imposte attraverso le diverse misure di pricing possono prima aumentare e poi diminuire e viceversa; inoltre, nel combinare le diverse strategie, l'efficienza aumenta quanto più finemente sono differenziate le tariffe adottate rispetto al modo, alla localizzazione, al tempo e alle caratteristiche del veicolo. A tal proposito, Bonsall et al. (2007) sottolineano come la logica con cui si articolano le tariffe e il loro grado di complessità debbano riflettere in maniera chiara gli obiettivi dello schema di pricing che si adotta. Il motivo di ciò va cercato nel fatto che vi è una generale avversione delle persone nei confronti di sistemi di tariffazione troppo complessi.

Strettamente legata al problema dell'accettabilità è la questione dell'utilizzo dei ricavi derivanti dalla tariffazione del trasporto privato. Le proposte avanzate a tal proposito in letteratura sono molteplici. Small (1992) propone di utilizzare i ricavi in diversi modi, ad esempio per ridurre le tasse, per costruire nuove strade e potenziare il trasporto pubblico e migliorare i business centers. Parry e Bento (2001) avanzano l'ipotesi di utilizzare i ricavi per alleggerire l'aggravio fiscale, allo scopo di ridurre le distorsioni prodotte dalle tasse sul lavoro. Un'altra possibile soluzione è quella proposta da Adler e Cetin (2001), i quali affermano che per vincere i problemi di accettabilità è necessario che gli utenti percepiscano il beneficio tangibile derivante dall'introduzione del road pricing. Considerano, quindi, il caso molto semplice di una coppia Origine-Destinazione, collegata da due archi, rappresentanti, rispettivamente, un'autostrada, su cui viene imposto pedaggio, e una strada ordinaria gratuita. Dimostrano che, se i ricavi derivanti dall'imposizione del pedaggio sull'autostrada sono ridistribuiti direttamente agli utenti dell'altra strada sotto forma di sussidio, quelli che si sposteranno su di essa per non pagare il pedaggio riceveranno, comunque, una compensazione

per l'aumento dei tempi di percorrenza. Estendendo l'applicazione del loro modello ad una reale area metropolitana, suggeriscono di utilizzare i ricavi del road pricing per fornire dei sussidi agli utenti del trasporto pubblico (ad esempio attraverso la riduzione dei biglietti). King et al. (2007) propongono di introdurre il congestion pricing sulle freeways e di ridistribuire i ricavi a tutte le città che sono da esse attraversate. Un'analisi molto dettagliata sull'utilizzo dei ricavi viene effettuata da Farrell e Saleh (2005). Utilizzando i dati raccolti con una campagna di interventiste condotta nella città di Edimburgo, viene studiato il punto di vista di tre classi di utenti (utenti del trasporto privato, utenti del trasporto collettivo e pedoni e ciclisti) rispetto all'allocatione dei ricavi derivanti dal road pricing. A tal proposito, agli intervistati sono state proposte cinque alternative: potenziamento del servizio di trasporto pubblico su gomma, incremento della spesa destinata alla manutenzione stradale, costruzione di nuove stazioni e linee su ferro, potenziamento dei collegamenti con le stazioni esistenti ed incremento delle frequenza e della capacità delle linee ferroviarie esistenti. Tra tutte le opzioni presentate, quella che ha riscontrato il maggior consenso (preferita da oltre il 90% degli intervistati) è il potenziamento del trasporto pubblico su gomma. Questo risultato non stupisce, in quanto è perfettamente in linea con quelli riscontrati qualche anno prima da Ison (2000) e da Thorpe et al. (2000). Infine, anche Ferrari (2006) affronta il delicato problema dell'utilizzo dei ricavi derivanti dal road pricing. Applicando un modello sviluppato in un precedente lavoro (Ferrari, 2005), osserva che in letteratura una delle proposte più avanzate è quella che prevede l'utilizzo dei ricavi per il potenziamento del trasporto pubblico. L'autore analizza, quindi, in quale circostanza il suddetto utilizzo sia conveniente o meno. A tal fine, costruisce una particolare rete test di forma quadrata e dimensioni variabili, all'interno della quale le strade formano una griglia perfettamente regolare e il sistema di trasporto pubblico è costituito da un servizio su gomma, che condivide le

infrastrutture con le auto. Applica, quindi, il modello di calcolo dei pedaggi basato sui vincoli di capacità ed ipotizza che metà¹² dei ricavi vengano usati per incrementare le frequenze delle linee su gomma. Assume come indicatore di benessere economico il surplus degli utenti calcolato attraverso il costo inclusivo dei due modi di trasporti ipotizzati (opposto della variabile soddisfazione), avendo ipotizzato la domanda elastica. Dalle analisi condotte, deduce che il beneficio, che gli utenti ricevono dall'utilizzo dei ricavi del road pricing per il finanziamento del trasporto pubblico, è tanto più elevato quanto maggiore è il livello di congestione nell'area urbana, prima dell'applicazione della tariffa, e quanto maggiori sono le dimensioni dell'area. Poiché il beneficio degli utenti assume valori significativi per livelli di congestione alquanto superiori rispetto a quelli che si osservano nelle aree urbane, Ferrari (2006) arriva alla conclusione che, da un punto di vista strettamente economico, nella generalità dei casi non appare conveniente impiegare il ricavo del road pricing per finanziare il trasporto pubblico, in particolare nelle città di piccole dimensioni, quando l'alternativa alle auto private è una rete di autobus che condividono con esse le strade. Ciò non esclude la possibilità di utilizzare i ricavi del road pricing nel trasporto pubblico per aumentare l'accettabilità delle politiche di pricing, quando queste vengono utilizzate come strumento per combattere la congestione e l'inquinamento. Probabilmente, le conclusioni a cui arriva Ferrari (2006) sono condizionate dalle particolari caratteristiche della rete di trasporto scelta per applicare il modello di calcolo dei pedaggi. E' riconosciuto che gli utenti che optano per il trasporto pubblico a seguito dell'introduzione di una tariffa vanno sicuramente incontro a tempi di viaggio superiori rispetto a quelli che avrebbero percepito continuando ad usare l'auto; l'unico contesto in cui questo effetto si mitiga è quello di reti dotate di sistemi di trasporto ad elevate prestazioni, come possono essere le linee metropolitane. In un

¹² L'autore ipotizza che i costi di gestione del sistema di pricing siano la metà dei ricavi sulla base dei dati forniti dal Transport for London relativamente al primo anno di esercizio della Congestion Charging.

sistema bimodale, in cui gli utenti possono scegliere tra auto privato e autobus, dove questi ultimi risentono della congestione perché condividono con le prime l'uso delle strade, probabilmente il road pricing non è la misura di gestione della domanda di mobilità più idonea. Inoltre, più che le dimensioni della rete, è il suo livello di articolazione che influisce sull'efficacia del road pricing e sull'utilizzo dei ricavi da esso derivanti. Queste osservazioni, insieme a quelle che è stato possibile cogliere attraverso un'attenta analisi degli schemi di pricing implementati nel mondo, hanno offerto lo spunto per condurre uno studio rigoroso sulla questione dell'uso dei ricavi.

Nota Bibliografica

Dalla letteratura è noto che i problemi di equilibrio delle reti di trasporto (*traffic assignment problem*) possono essere classificati in funzione alle ipotesi comportamentali alla base dei modelli di scelta del percorso. Per una descrizione dettagliata della classificazione dei modelli di assegnazione si può fare riferimento a Cantarella e Cascetta (2001). In generale, se si assume che gli utenti abbiano una conoscenza perfetta dell'utilità associata a ciascun elemento del proprio insieme di scelta e scelgano tra tutti i percorsi disponibili quello di minimo costo (massima utilità), si parla di *Deterministic User Equilibrium* (DUE). Se invece si assume l'utilità percepita dagli utenti affetta da un errore e, quindi, avente natura aleatoria, si parla di *Stochastic User Equilibrium* (SUE). Esiste una terza tipologia di equilibrio, nota come *System Optimum* (SO), basata sull'ipotesi comportamentale, poco realistica, che gli utenti scelgano i percorsi in modo da minimizzare non il costo individuale ma il costo totale della rete. I problemi di tipo DUE e SO discendono, rispettivamente, dal primo e dal secondo principio di Wardrop (1952) e il loro confronto è stato da sempre oggetto di studio nella teoria dei sistemi di trasporto. Dafermos e Sparrow (1969), per fare una distinzione tra queste due condizioni, hanno introdotto le espressioni *user-optimized transportation networks* e *system-optimized transportation networks*. Tipicamente, la relazione esistente tra DUE e SO viene descritta attraverso il ben noto *Paradosso di Braess*. Una descrizione completa del suddetto paradosso è fornita da Pas e Principio (1997). Gli autori sottolineano come il paradosso venga spesso utilizzato in letteratura per dimostrare come l'applicazione del road pricing sia grado di produrre un miglioramento nel funzionamento di una rete di trasporto. Prashker e Bekhor (2000) effettuano un confronto tra le soluzioni dei problemi DUE, SUE e SO per differenti ranges della domanda assegnata ad una data rete di trasporto. L'indicatore utilizzato per stabilire quale problema, tra DUE e SUE, fornisca una soluzione più prossima a quella del problema DUE, è il tempo totale speso dagli utenti nel sistema. In Maher et al. (2005) viene formulato il problema Stochastic Social

Optimum (SSO) come naturale estensione del problema SO quando si passa da approccio comportamentale deterministico (DUE) ad uno stocastico (SUE).

Per quanto concerne il problema dell'equilibrio delle reti di trasporto in presenza di vincoli capacità, molteplici sono gli autori che lo hanno affrontato. Beckmann, McGuire, Winsten, (1956), si sono interessati dei vincoli di capacità nel caso di funzioni di costo separabili; essi hanno supposto che il costo di un arco tende ad infinito quando il flusso si avvicina alla capacità; secondo Papageorgiou et al. (1990) questa ipotesi non è verificata nelle carreggiate di un'autostrada perché il costo di viaggio aumenta gradualmente avvicinandosi alla capacità dell'arco, mentre la comparsa di instabilità è accompagnata da una marcata riduzione del flusso, che si manifesta muovendosi all'interno della carreggiata. Smith, (1979), è il primo a considerare vincoli di capacità nel caso di funzioni di costo non separabili e domanda fissa; ha fornito una condizione sufficiente sulle funzioni di costo per l'esistenza dell'equilibrio, che si riduce alla condizione di Beckmann, McGuire e Winsten quando le funzioni di costo e i vincoli sono separabili. Daganzo, (1977a, 1977b) ha proposto un metodo di calcolo per la soluzione di equilibrio delle reti con vincoli di capacità e funzioni di costo entrambi separabili; questo metodo deriva da una variazione dei tradizionali algoritmi di assegnazione nel caso di domanda fissa ed è basato sull'ipotesi che i costi tendono ad infinito quando i flussi si avvicinano alla capacità. Hearn e Ribera (1980), non hanno fatto alcuna ipotesi sulle proprietà asintotiche delle funzioni di costo e hanno studiato il problema dell'equilibrio delle reti nel caso di vincoli di capacità e funzioni di costo entrambi separabili e domanda fissa; hanno dimostrato che dei costi addizionali possono essere imposti sugli archi su cui sono violati i vincoli, in modo tale da soddisfare il principio di Wardrop (1952); tali costi addizionali sono uguali ai moltiplicatori lagrangiani dei vincoli di capacità. Altri autori (Payne e Thomson, 1975; Smith, 1987; Bell, 1995; Larson e Patriksson, 1995) hanno dato una differente interpretazione dei moltiplicatori dei vincoli di capacità nell'equazione di Karush-Kuhn-

Tucker del problema di minimo associato con l'equilibrio di Wardrop. Tali autori hanno considerato il costo di un arco formato dalla somma di due termini: il tempo di running (tempo di percorrenza dell'arco) e il ritardo medio all'intersezione semaforizzata nel nodo finale dell'arco. Considerando solo il tempo di running nelle funzioni di costo, hanno dedotto che i ritardi medi sono misurati dai moltiplicatori dei vincoli di capacità dovuti al tasso di servizio dei segnali, così che l'equilibrio della rete è assicurato in ogni caso. Tuttavia hanno osservato che il ritardo è una conseguenza di un processo stocastico di formazione di una coda. Quando il tasso di flusso si avvicina al tasso di servizio, la lunghezza della coda e il ritardo tendono ad infinito e il processo stocastico diventa instabile (Kendall, 1951; Webster, 1958). Quindi le condizioni di stazionarietà non possono esistere in una rete in cui il tasso di flusso uguaglia il tasso di servizio dei segnali. Questo significa che, quando una rete urbana è in equilibrio, non ci sono vincoli di capacità attivi a causa del tasso di servizio dei segnali. Yang e Yagar, (1994), hanno studiato il problema dei vincoli di capacità sulle rampe di accesso controllate alle autostrade; il corrispondente moltiplicatore è il ritardo medio che deve essere imposto dal segnale in modo da garantire l'esistenza dell'equilibrio che soddisfa il vincolo di capacità.

2. POLITICHE DI PRICING NEL MONDO

2.1 Schemi di pricing

Nel campo delle politiche di pricing esiste una vasta nomenclatura utilizzata per indicare tutte quelle misure che impongono agli automobilisti il pagamento di una somma per poter utilizzare uno spazio stradale. Poiché il pagamento può essere interpretato in senso statico (si paga per occupare una certa porzione di spazio) e dinamico (si paga per attraversare una certa porzione di spazio), la prima differenziazione può essere fatta tra politiche di pricing riguardanti la sosta (*parking pricing policies*) e politiche di pricing riguardanti l'attraversamento (*road pricing policies*). Bisogna notare che la suddetta distinzione ha carattere puramente formale perché sia le politiche di tariffazione della sosta che qualunque altra politica di tariffazione stradale possono essere definite come soluzioni di tipo second-best dello stesso problema di efficienza dei sistemi di trasporto e, pertanto, si appoggiano sullo stesso apparato teorico-modellistico. Tipicamente, alle politiche di parking pricing è riconosciuta una maggior facilità applicativa in termini di accettabilità da parte dell'utenza e, per contro, una minor efficacia derivante dall'impossibilità di effettuare i controlli in maniera completamente automatica e, di conseguenza, dai maggior costi di gestione dovuti al personale da impiegare per i suddetti controlli; viceversa, alle politiche di road pricing è riconosciuta una certa difficoltà applicativa in termini di accettabilità ma un'estrema versatilità nell'impiego di tecnologie che permettono la completa automatizzazione sia del sistema di pagamento che di controllo. Per quanto riguarda la classificazione delle strategie, le

politiche di parking pricing possono essere differenziate rispetto alla località in cui avviene la sosta (con tariffe maggiori per il centro e minori per le zone periferiche) e rispetto al tempo di permanenza nel sistema (tariffe orarie). Molto più articolata è la classificazione delle politiche di road pricing in ambito urbano. La tariffazione, in questo caso, può interessare l'attraversamento di un arco (*toll*), l'attraversamento di un cordone (*cordon pricing*) o l'accesso ad una zona (*area pricing*). I tolls imposti su particolari archi della rete possono essere indipendenti dalla lunghezza dello spostamento e dal momento in cui avviene l'attraversamento del tratto stradale (*fixed tolls*), funzione della lunghezza dello spostamento (*distance-based tolls*) o funzione della fascia oraria in cui avviene lo spostamento (*time-dependent tolls*). Il cordon pricing può riferirsi all'attraversamento di un singolo cordone (*single cordon pricing*) o all'attraversamento di cordoni multipli (*multiple cordon pricing*); le tariffe possono essere fisse o variabile rispetto alla fascia oraria. Per l'area pricing, poiché la tariffa di accesso è tipicamente costante durante l'intero arco della giornata, la differenziazione può essere fatta rispetto alla tipologia o alla classe di inquinamento del veicolo. Infine, si parla di *electronic road pricing* quando il sistema di pagamento è completamente automatizzato e *congestion pricing* o *congestion charging* quando lo scopo della politica è dichiaratamente la riduzione dei livelli di traffico.

Mentre le politiche di parking pricing sono una pratica molto diffusa, sebbene non vengano progettate, nella maggior parte dei casi, in un'ottica di efficienza e buon funzionamento dei sistemi di trasporto, sicuramente meno numerosi sono gli esempi di politiche di road pricing in ambito urbano. Al fine di approfondire alcune delle problematiche connesse all'implementazione delle strategie di pricing, in questo capitolo vengono analizzate le misure adottate a Singapore, in tre città Norvegesi (Bergen, Oslo e Trondheim), a Londra, a Stoccolma e a Milano.

Il sistema di road pricing urbano più longevo al mondo è quello di Singapore, introdotto nel 1975 al fine di ridurre la congestione e l'inquinamento e migliorare, di conseguenza, le condizioni di vivibilità all'interno della città. La strategia adottata è una forma di cordon pricing,

che impone il pagamento di un pedaggio agli utenti che attraversano un cordone.

Anche la Norvegia presenta una lunga tradizione nell'uso di politiche di pricing in ambito urbano: le tre più grandi città del paese Bergen (1986), Oslo (1990) e Trondheim (1991), hanno, infatti, adottato schemi di cordon pricing, comunemente noti come *Toll Rings*. La particolarità dei sistemi norvegesi è che, mentre in tutti gli altri schemi esaminati in questo lavoro di ricerca il road pricing viene utilizzato come uno strumento di Transportation Demand Management, ossia per gestire la domanda di mobilità in modo da orientarla verso sistemi di trasporto alternativi all'auto privata e più sostenibili, in tal caso l'introduzione dei pedaggi è finalizzata al recupero di fondi per finanziare la costruzione di nuove infrastrutture e il potenziamento del trasporto collettivo.

Probabilmente, il sistema di pricing più noto e monitorato al mondo è la *Congestion Charge* di Londra, introdotto nel 2003 dal sindaco laburista Ken Livingstone con l'obiettivo prioritario di ridurre i volumi di traffico in ingresso e circolante all'interno dell'area sottoposta a tariffazione. Lo schema di pricing adottato rientra nella categoria dell'area pricing, in quanto permette agli utenti di entrare ed uscire dall'area sottoposta alla tariffazione senza alcun limite, una volta che è stato effettuato il pagamento per l'accesso. Ogni anno, viene redatto a cura del Transport for London (TfL) un dettagliato rapporto sullo stato del sistema di pricing londinese.

Nel 2006 la città di Stoccolma, per poter gestire l'elevata domanda di mobilità che interessava il suo centro nelle ore di punta, ha sperimentato uno schema di pricing accompagnato da una politica di potenziamento del trasporto pubblico. Nel settembre dello stesso anno con un referendum la cittadinanza ha acconsentito a rendere lo schema permanente. Lo schema adottato nella capitale svedese rientra nella categoria del cordon pricing.

Recentemente (2 gennaio 2008), anche la città di Milano, per ridurre la congestione e promuovere l'uso di modalità di trasporto più sostenibili rispetto all'auto, ha introdotto uno schema di area pricing simile a quello londinese, noto con il nome di *Ecopass*. E sempre in analogia con la

capitale inglese, con cadenza regolare, l'Agenzia Mobilità Ambiente e Territorio (AMAT) pubblica un rapporto sullo stato del sistema dei trasporti. Il principio su cui si basa la politica di pricing è “chi inquina paga”, pertanto la tariffa è modulata sulla base della classe di inquinamento del veicolo (Normative Europee Euro0-1-2-3-4-5), nonché sulla tipologia di trasporto (persone o merci).

2.2 Electronic Road Pricing di Singapore

Con la sua lunga esperienza in materia di road pricing, Singapore rappresenta un caso unico al mondo in quanto si tratta dell'unico schema di road pricing su scala urbana appositamente progettato per la riduzione dei livelli di traffico (Olszewski e Xie, 2005). Il primo schema di road pricing è stato introdotto nel giugno del 1975 con l'obiettivo di ridurre la congestione nelle fasce di picco. Si trattava di uno schema con permessi cartacei applicati solo durante le ore di punta mattutine, noto anche come *Area Licensing Scheme* (ALS). Poiché i permessi avevano un costo variabile nel tempo e funzione delle caratteristiche dei veicoli, nel 1998 il sistema è stato completamente automatizzato con l'introduzione del noto *Electronic Road Pricing* (ERP) *System*. Il principio su cui si basa tale sistema di pricing è semplicemente “pay-as-you-use”.

Negli oltre 30 anni di esercizio, le tariffe sono state più volte modificate, sia sotto lo schema ALS che con l'attuale sistema ERP e ciò ha permesso di raccogliere un elevato numero di dati per studiare la sensibilità del comportamento degli utenti rispetto all'introduzione del road pricing. Bisogna sottolineare che una delle maggiori difficoltà nel valutare i potenziali benefici derivanti dall'introduzione del road pricing consiste proprio nel prevedere la risposta comportamentale degli automobilisti a seguito dell'introduzione di una tariffa. Finché si utilizzano schemi di pricing con pedaggi *flat*, cioè indipendenti dal tempo, una stima di quello che sarà l'impatto del road pricing sul traffico può essere fatta a partire dalla conoscenza dell'elasticità della domanda. E' evidente, tuttavia, che tale metodo può risultare inadeguato per modellizzare i meccanismi di

scelta degli utenti quando le tariffe sono variabili nell'arco della giornata e gli automobilisti possono riprogrammare i loro spostamenti in funzione dei periodi con tariffe più basse. I numerosi dati raccolti a Singapore, hanno permesso di analizzare in maniera dettagliata l'elasticità della domanda di mobilità rispetto al road pricing, mentre in molti altri studi ci si è dovuti accontentare di analisi basate su indagini Stated Preference (Bates et. al, 1990; Polak et. al, 1992; O'Mahony et. al, 2000).

Con il sistema di riscossione elettronica il pedaggio è detratto automaticamente da una smart card prepagata, quando il veicolo transita sotto un portale elettronico, per mezzo di un sistema di comunicazione radio a corto raggio (*Dedicated Short-Range Communication*, DSRC). Attualmente sono in esercizio 45 portali: 28 formano un cordone attorno all'area centrale, in cui è stata definita una zona a traffico limitato, la cosiddetta *Restricted Zone* (RZ), che racchiude il Central Business District (CBD), 12 sono posizionate su segmenti autostradali e 5 su strade di scorrimento. Il pedaggio lungo il cordone è applicato dalle 7:30 alle 19:00 con ingresso libero dalle 10:00 alle 12:00. Su tutte le altre strade il pedaggio è, invece, applicato soltanto durante il periodo di punta del mattino, dalle ore 7:30 alle ore 9:30. Il grande vantaggio offerto dal sistema elettronico è che permette di modulare i pedaggi in base al luogo, alla fascia oraria e al tipo di veicolo, in modo che le tariffe siano sempre funzione degli livelli di congestione raggiunti all'interno del sistema. Il metodo utilizzato per far variare le tariffe in funzione della fascia oraria, il cosiddetto *shoulder pricing*, permette di incrementare gradualmente i pedaggi ogni mezz'ora prima del picco e di diminuirli con lo stesso tasso ogni mezz'ora dopo il picco. Tale tecnica serve per scoraggiare gli automobilisti ad accelerare o rallentare al fine di evitare il pagamento di un pedaggio più alto (Land Transport Authority, LTA).

Dai dati raccolti, si è osservato che a Singapore il traffico è piuttosto sensibile ai pedaggi, nonostante questi siano mantenuti ad un livello tendenzialmente basso: il massimo pedaggio (secondo le tariffe in vigore

dal 3 agosto 31 ottobre 2009) per un'automobile su un'autostrada può arrivare a 4S\$¹³ (poco più di 1,90 euro), mentre all'interno del cordone, se l'attraversamento è effettuato in un giorno feriale, può essere al più di 3,00S\$ (circa 1,44 euro), ovvero l'equivalente di un'ora di parcheggio nel centro della città. Le velocità del traffico sono continuamente monitorate dall'agenzia Land Transport Authority e le tariffe sono rimodulate ogni tre mesi in modo da mantenere le velocità all'interno di una banda desiderata. In particolare, per le autostrade il range delle velocità è 45-65 km/h, mentre per le strade di scorrimento è 20-30 km/h. Con questa tecnica, le tariffe vengono aumentate quando le velocità scendono al di sotto del range fissato e diminuite quando risultano maggiori. Inoltre, la Land Transport Authority ha creato un portale interattivo che informa gli utenti sulla dislocazione dei varchi elettronici, fornendo le tariffe di attraversamento di ciascun arco in base al giorno della settimana, alla tipologia del veicolo e alla fascia oraria.

Inizialmente, quando è stato introdotto il sistema dei permessi cartacei ALS nel 1975, erano esenti dal pagamento del pedaggio i mezzi di trasporto pubblico, i mezzi destinati al trasporto merci, i motocicli e i mezzi con un numero di passeggeri uguale o superiore a tre, escluso il conducente, in modo da incentivare la diffusione del *car-pooling* (Keong, 2002). L'esenzione del pagamento per i taxi è stata rimossa subito, nell'agosto 1975; con il passare del tempo sono state rimosse anche le altre. Nel giugno 1998 è stata rimossa l'esenzione per i motocicli e per i mezzi pesanti, che costituivano circa i due terzi del traffico entrante nella *Restricted Zone*. Questa esenzione aveva prodotto un innaturale aumento del numero dei mezzi di trasporto per merci di piccole dimensioni, che venivano utilizzati come auto. Successivamente, anche l'esenzione per il car-pooling è stata abolita; pertanto, gli unici mezzi che continuano a non pagare sono gli autobus destinati al trasporto pubblico e i veicoli di emergenza.

Quando nel 1998 è stato introdotto il sistema elettronico, è stata

¹³ Tutte le tariffe riportate in questo capitolo ed espresse in dollari di Singapore (S\$), corone norvegesi (NOK), sterline (£) e corone svedesi (SEK) sono state convertite in euro utilizzando i valori di cambio al 25 novembre 2009.

osservata una significativa riduzione del 15% dei livelli di traffico (Menon 2000), nonostante i livelli tariffari fossero più bassi rispetto al precedente sistema ALS. Questa riduzione è attribuibile al fatto che si è passati da un sistema di tipo area pricing ad uno di tipo cordon pricing, che colpendo i singoli spostamenti piuttosto che la mobilità giornaliera, è andata ad agire soprattutto sugli utenti che effettuano catene di spostamenti (Olszewski e Xie, 2005).

Al di là di tutte le considerazioni relative all'evidente efficacia delle strategie di pricing adottate, come notato da Stewart (2007), lo schema di Singapore risulta particolarmente interessante perché è stato utilizzato con successo un sistema elettronico di road pricing quando gli studi condotti in Inghilterra guardavano ancora con scetticismo le implementazioni di sistemi così tecnologicamente avanzati. Il successo dello schema di Singapore suggerisce che gli schemi elettronici sono una realtà possibile e non una remota eventualità per il futuro. Anche se si tratta ancora di uno schema di cordon pricing, il sistema di Singapore presenta un potenziale tecnologico per essere trasformato in uno schema di tipo link-based, cioè uno schema di tipo first-best che prevede la tariffazione di ogni arco della rete. Quindi l'implementazione di una strategia di tipo second-best, come il cordon pricing, che evolve gradualmente verso una strategia di first-best, come link-based tolls, è di fatto attualmente realizzabile.

2.3 Toll Rings in Norvegia

Diversamente da Singapore, in Norvegia i pedaggi urbani non sono stati introdotti allo scopo di ridurre la congestione, bensì al fine di reperire nuove fonti di finanziamento da affiancare ai fondi governativi per la realizzazione di alcuni progetti. In effetti, in Norvegia il ricorso ai pedaggi stradali come fonte di finanziamenti da affiancare a quelli pubblici è una pratica consolidata da oltre un secolo ed ha avuto una diffusione considerevole negli ultimi venti anni (Odeck e Bråten, 2008). Mediamente, il 25% del budget annuale destinato alla costruzione di nuove strade deriva dai ricavi dei pedaggi. Tre grandi città, Oslo, Trondheim e Bergen, hanno

adottato politiche di pricing in ambito urbano; a Trondheim è stato usato uno schema che si avvicina molto ad uno schema del tipo congestion charging, in quanto le tariffe erano variabili nell'arco della giornata in base ai livelli di traffico.

A partire dagli anni '70 la città di Bergen è stata interessata da elevati livelli di congestione, con conseguente aumento di costi esterni in termini di incidenti e inquinamento. Per far fronte a questo problema, dovuto in parte allo sviluppo urbano che ha interessato la regione, è stato messo a punto un progetto che prevedeva la costruzione di nuove strade, il potenziamento del trasporto pubblico, la costruzione di parcheggi multipiano e diverse campagne di sensibilizzazione ambientale per le aree centrali. Il piano di riassetto del sistema di trasporto è stato presentato nel 1983 e con le sole disponibilità finanziarie del governo sarebbero stati necessari 30 anni per la sua realizzazione. Si è pensato, allora, di utilizzare i pedaggi stradali come forma di finanziamento; pertanto, diversamente da tutte le altre politiche di tariffazione stradale urbana presentate in questo capitolo, la riduzione della congestione non era tra gli obiettivi della politica di pricing implementata a Bergen.

Il sistema di pedaggi è diventato operativo a partire dal 2 gennaio 1986; come schema è stata scelta una forma di cordon pricing (*Toll Ring*), che ha richiesto la dislocazione di 9 stazioni in corrispondenza di tutti i principali accessi al centro cittadino. La tassazione per l'accesso alla città è attiva dal lunedì al venerdì dalle 6:00 alle 22:00; sono esenti soltanto gli autobus. In più di venti anni di esercizio, le tariffe hanno subito delle variazioni: infatti, inizialmente, le auto pagavano 5 NOK (circa 0,60 euro) ed i mezzi pesanti 10 NOK (poco meno di 1,20 euro); nel 1999 le tariffe sono state raddoppiate. A partire dal 1 febbraio 2004 è stato introdotto un sistema elettronico di riscossione dei pedaggi, cioè un *Electronic Toll Collection* (ETC) *System*, il *Q-Free AutoPass*, che permette l'identificazione dei veicoli attraverso un'unità montata a bordo (la cosiddetta OBU, *on board unit*). In occasione dell'automatizzazione del sistema, i pedaggi sono stati ulteriormente aumentati e portati a 15 NOK (circa 1,78 euro) per le auto e 30 NOK (circa 3,56) per i mezzi pesanti (Ieromonachou e al., 2006).

Prendendo come riferimento i livelli di traffico esistenti nel 1986, i pedaggi sono stati progettati per generare ogni anno 35 milioni di NOK (circa 4,16 milioni di euro). In realtà, i ricavi annui sono stati più elevati; nel 2000 i ricavi ottenuti sono raddoppiati rispetto a quelli previsti per il 1986, arrivando a 70 milioni di NOK (circa 8,32 milioni di euro). Di questi il 70% è stato utilizzato per la costruzione di strade, il 20% è andato a coprire i costi di gestione e il 10% è stato destinato ad altri scopi con la creazione di un fondo generico. Nel primo periodo di esercizio, naturalmente, l'allestimento dei caselli per pagamento dei pedaggi ha comportato costi di gestione più alti di quelli registrati quando il sistema è andato a regime.

L'obiettivo dell'introduzione del Toll Ring di Bergen non era, come sottolineato in precedenza, la riduzione del traffico, sebbene inizialmente si sia registrata una diminuzione del 6-7% dei flussi veicolari entranti in città. In realtà, la costruzione di nuove infrastrutture, resa possibile grazie ai proventi derivanti dai pedaggi, ha portato ad un aumento del numero dei veicoli circolanti. Infatti, prima del 1986 a Bergen si registrava uno dei più bassi valori di numero di auto per abitanti della Norvegia (345 veicoli per 1000 abitanti) mentre nel 2000 è stata raggiunta la media nazionale di 400 veicoli per 1000 abitanti (International Road Federation, 2000), con un incremento di circa il 16%. Un aumento così significativo del volume di traffico ha richiesto l'utilizzo di un efficace strumento di gestione della domanda di trasporto privato: per questo motivo nel centro cittadino le tariffe di sosta imposta sono 10-20 volte i pedaggi per l'accesso al centro e sono fortemente differenziate in base alla durata e alla localizzazione della sosta. L'uso del parking pricing è servito a ridurre il traffico all'interno della città di Bergen, anche se complessivamente nell'intera regione si continua registrare un incremento annuo del 3-5%.

Lo schema di Toll Ring di Bergen doveva cessare nel 2001, ma è stato sviluppato per la città un nuovo progetto, pertanto la fine è stata rimandata al 2011 (Tretvik, 2003). Accanto agli investimenti nella costruzione di nuove infrastrutture stradali, è previsto, con il nuovo programma, anche il potenziamento del trasporto pubblico.

Quattro anni dopo, nel febbraio 1990, anche ad Oslo è stato introdotto uno schema Toll Ring. Analogamente a quanto successo nella città Bergen, l'obiettivo principale che ha portato all'implementazione dello schema di cordon pricing è stato il reperimento di fondi per il finanziamento di nuove infrastrutture stradali, piuttosto che la necessità di trovare efficaci strumenti di gestione della domanda di mobilità. Inizialmente il pedaggio ammontava a 11 NOK (circa 1,31 euro) a passaggio; attualmente è di 20 NOK (circa 2,38 euro). La possibilità di effettuare il pagamento manualmente è durata solo pochi mesi perché nel 1991 è stato introdotto il sistema ETC AutoPass. Per avere un'idea di come gli automobilisti abbiano gradito l'introduzione del sistema elettronico basti pensare che il 60% degli utenti che ogni giorno attraversa il cordone utilizza il sistema Auto Pass e che tale percentuale sale al 85% nelle ore di punta (Ieromonachou et al., 2007a).

Le stazioni operative collocate nell'anello di Oslo sono 19; hanno dimensioni variabili a seconda della strada servita e sono posizionate ad una distanza dal centro della città compresa tra i 3 e gli 8 km, in modo tale da massimizzare i ricavi. Il pagamento può avvenire elettronicamente, per mezzo di cassa automatica e manualmente (quest'ultima modalità è usata tipicamente dai mezzi pesanti e dai visitatori occasionali). Durante il primo anno di esercizio i costi di investimento sono stati di 250 milioni di NOK (circa 29,71 milioni di euro), mentre i ricavi sono stati di 750 milioni di NOK (circa 89,12 milioni di euro), per un rapporto di costi su ricavi del 33%. Nel 2004 i ricavi sono arrivati a 1192 milioni di NOK (circa 141,63 milioni di euro). I costi operativi attualmente rappresentano soltanto il 10% dei ricavi. In entrambi i progetti realizzati dal comune di Oslo (Oslopakke1, 1990-2007; Oslopakke2, 2001-2007) è stabilito che i ricavi possono essere usati per finanziare nuove strade e il trasporto pubblico e non per coprire i costi di gestione. Esiste la possibilità che venga realizzato un progetto Oslopakke3. Quando sono stati implementati gli schemi di Bergen e Oslo, le amministrazioni hanno avuto qualche problema riguardo all'accettabilità in quanto l'introduzione dei pedaggi urbani ha suscitato non poche ostilità da parte degli utenti, che hanno visto i pedaggi come

una tassa che si andava ad aggiungere alle già presenti tasse sui veicoli e sulla benzina e agli elevati costi di assicurazione.

Nell'ottobre del 1991, un anno dopo l'introduzione dello schema di Oslo, è stato introdotto uno schema di Toll Ring a Trondheim, la terza città della Norvegia per dimensioni, con il primo sistema al mondo di riscossione dei pedaggi completamente elettronico. Le tariffe in questo caso risultavano variabili nell'arco della giornata (ore di picco e di morbida) e della settimana (giorni feriali e giorni festivi). Al passaggio attraverso uno dei 12 varchi ciascun veicolo veniva riconosciuto attraverso una targa elettronica montata sul parabrezza. Ai visitatori occasionali era data la possibilità di pagare con carte di credito o con monete in prossimità delle stazioni di pedaggio. Nel 2003 sono state introdotte 10 nuove stazioni, quando mancavano solo 2 anni al termine del periodo di operatività del sistema di pedaggi urbani. Ma i 16 milioni di NOK (circa 1,90 milioni di euro) investiti nella costruzione delle nuove stazioni sono stati ampiamente recuperati dai 60 milioni di NOK (circa 7,13 milioni di euro) di ricavi. Il sistema ha cessato di essere operativo il 31 dicembre 2005.

E' evidente che, in tale contesto, i sistemi norvegesi rappresentano un'anomalia, in quanto i Toll Rings non rientrano nella categoria degli strumenti di pricing orientati alla gestione della domanda di mobilità. Ciò nonostante, sono tra i più noti schemi di pricing al mondo perché, fatta eccezione per il singolare caso di Singapore, sono i sistemi di road pricing applicati in ambito urbano più longevi ed avanzati da un punto di vista tecnologico. Un altro aspetto che rende i Toll Rings norvegesi estremamente interessanti è il valore notevolmente basso del rapporto tra costi di gestione e ricavi da traffico, che si aggira mediamente intorno al 10% ed è un'ovvia conseguenza della necessità di massimizzare i ricavi derivanti dalla tariffazione. Come si vedrà nel seguito, questo rapporto può risultare nettamente più elevato, se si opta per un sistema di road pricing non elettronico, come nel caso di Londra. La riflessione che nasce da questa semplice osservazione è che, quando si implementa una politica di pricing in ambito urbano, l'ottimizzazione potrebbe essere allargata anche al problema della scelta tecnologica e non limitata ai livelli tariffari.

2.4 Congestion Charging di Londra

A partire dal 2003, fortemente voluto dal sindaco Ken Livingstone, nel centro londinese è stato introdotto lo schema di pricing più famoso al mondo, al fine di perseguire quattro obiettivi prioritari, quali ridurre la congestione, potenziare le prestazioni del trasporto pubblico su gomma, ridurre i tempi di percorrenza del trasporto privato, rendere più efficiente la distribuzione di merci, e un obiettivo più generale, quale reperire dei fondi per sostenere la politica dei trasporti (Transport for London, 2007b). L'idea di introdurre il road pricing nella capitale inglese era già stata discussa molti anni prima nel rapporto Smeed del Ministero dei Trasporti (1964). Nonostante lo schema implementato a Singapore nel 1975 dimostrasse come fosse possibile adottare una misura di gestione della domanda di mobilità in ambito urbano così radicale, nel Regno Unito mancava ancora la maturità politica perché l'idea di imporre una tassa sulla congestione prendesse realmente consistenza. Bisogna aspettare, quindi, la fine degli anni novanta perché la possibilità di introdurre il road pricing venga chiaramente definita dalla legislatura attraverso una serie di documenti ed atti ufficiali: il Transport White Paper "A New Deal for Transport: Better for Everyone" (DETR, 1998a), il documento governativo "Breaking the Logjam" (DETR, 1998b), gli atti "Greater London Authority Act" (HMG, 1999) e "Transport Act 2000" (HMG, 2000). Sulla base del suddetto quadro normativo, il governo inglese affida alle autorità locali il potere di introdurre una tariffazione in ambito urbano sull'uso degli spazi stradali, inteso non solo nel tradizionale senso statico, come accade per il pagamento della sosta, ma anche dinamico. Va osservato che l'aspetto legislativo gioca un ruolo molto importante nell'implementazione delle politiche di pricing in scala urbana, in quanto molto spesso le autorità si trovano di fronte ad un vuoto normativo da dover colmare nel minor tempo possibile, in modo da poter rendere realizzabili le strategie entro i limiti delle legislature correnti. Per comprendere meglio la mole degli sforzi compiuti dal governo britannico per rendere il road pricing in

ambito urbano una realtà, basti pensare che in Italia non esiste attualmente una normativa chiara e definita in materia e, pertanto, l'applicabilità delle politiche di pricing è limitata a determinate circostanze. In particolare, l'introduzione di una misura che prevede il pagamento per l'accesso ai centri urbani è disciplinata dall'articolo 7 del Codice della Strada e dalla Direttiva Ministero dei Lavori Pubblici n. 3816/1997, secondo cui l'introduzione di una forma di pricing per l'accesso ad un centro urbano deve essere subordinata all'istituzione di una ZTL e prevista da un Piano Urbano del Traffico; però, se la misura di pricing viene adottata in forma sperimentale per un periodo limitato, di durata inferiore ad un anno, non è più necessaria la previsione nel Piano.

L'introduzione del road pricing a Londra è stata, inoltre, preceduta, da una serie studi, come The London Congestion Charging Research Programme (Government Office for London, 1995) ed il rapporto ROCOL (Government Office for London 2000), entrambi commissionati dal governo inglese per studiare i potenziali benefici del road user charging nel centro di Londra. La particolarità del secondo rapporto è che si tratta uno studio condotto da un team di esperti, il ROCOL (Review of Charging Options for London) Working Group, fondato nell'agosto 1998 allo scopo di fornire delle valutazioni riguardo al potere che avrebbe avuto il nuovo sindaco di Londra con la possibilità di introdurre il road pricing in ambito urbano. Pur esistendo una vasta gamma di schemi di pricing applicabili nel caso londinese, nel rapporto ROCOL vengono considerati solo quelli che possono essere implementati nel più breve tempo possibili. Il rapporto affronta, inoltre, i possibili effetti del road pricing sul traffico e sui trasporti in genere, nonché sull'opinione pubblica. I numerosi studi condotti dimostrano quanta energia sia stata investita dal governo inglese anche nel campo della ricerca per supportare l'introduzione di una strategia di gestione del traffico così radicale come può essere il road pricing.

Interamente progettato e gestito dal Transport for London (TfL), il *Congestion Charging Scheme* (LCCS), viene introdotto il 17 febbraio 2003. Lo schema adottato prevedeva inizialmente il pagamento di £5 (circa 5,54€)

per tutti i veicoli che entravano, uscivano, parcheggiavano o guidavano all'interno dell'area centrale di Londra, nella fascia oraria compresa dalle 7:00 alle 18:00, tutti i giorni dal lunedì al venerdì. Successivamente, il 4 luglio 2003, l'ammontare della tariffa è stato portato a £8 (circa 8,56€). Lo schema iniziale ha subito nel corso degli anni diverse variazioni: infatti, nel luglio 2004, quando è stato introdotto l'incremento tariffario, il periodo di funzionamento è stato esteso fino alle 18:30; successivamente, il 19 febbraio 2007 si è avuta un'estensione ad ovest della zona sottoposta a pagamento (la cosiddetta *charging zone*, contenuta all'interno dell'*Inner Ring Road*) e, contemporaneamente, la fascia oraria di applicazione del road pricing è stata riportata al periodo 7:00-18:00, (Santos, 2007). Le dimensioni della charging zone erano inizialmente piuttosto ridotte, circa 22 km², coprendo solo 1,3% della Greater London (Ieromonachou et. al., 2007b). Attualmente, con i loro 39 km², rappresentano il 2,4% della Greater London.

Le modalità e le procedure di pagamento offerte agli utenti sono molteplici: si può pagare la tariffa per un giorno, per una settimana o un intero mese; il pagamento può essere fatto entro le 24 ore o il giorno dopo (con un incremento di £10, pari a 11,07€ circa); si può pagare online, via SMS, alle stazioni di servizio, di persona in alcuni negozi. Sono previste, inoltre, delle agevolazioni per le aziende che hanno flotte di veicoli. Esistono alcune categorie esenti dal pagamento, quali veicoli a due ruote, veicoli di emergenza, veicoli destinati a disabili, taxi, alcuni veicoli militari, veicoli con carburanti alternativi e mezzi per il soccorso stradale. Per i residenti è prevista una tariffa ridotta di £4 (circa 4,43€) a settimana. Il controllo delle infrazioni avviene attraverso un sistema di telecamere, posizionate in corrispondenza di tutte le entrate e le uscite della charging zone e al suo interno, che sfruttano la tecnica di riconoscimento automatico delle targhe Automatic Number Plate Recognition (ANPR). Il sistema ANPR rileva le targhe di tutti i veicoli che entrano, escono e si muovono nell'area sottoposta a pagamento; quindi, viene verificato se a ciascuna targa corrisponde un pagamento; nel caso di trasgressione, tramite una procedura manuale, viene rintracciato il trasgressore e viene

avviata la notifica della multa.

L'attivazione del Congestion Charging Scheme è stato solo uno degli interventi previsti dalla politica dei trasporti promossa dal sindaco di Londra; infatti l'introduzione del road user charge è stata preceduta da un notevole potenziamento del trasporto pubblico su gomma, con un aumento del 23% degli autobus entranti nella charging zone rispetto all'anno precedente (Transport for London, 2004). Da un punto di vista politico, l'introduzione del road pricing è stata un grande successo. Molti londinesi sono stati soddisfatti dal sistema di pricing introdotto e Kevin Livingstone ha avuto talmente tanta approvazione da essere rieletto nel 2004, in parte anche grazie alla congestion charge (Prud'homme e Bocarejo, 2005).

Andando ben oltre il range di variazione previsto dal TfL, dopo un solo anno di esercizio, la congestione all'interno della charging zone ha subito una riduzione del 30%, mentre il traffico entrante nella zona sottoposta a pedaggio e quello circolante all'interno della stessa sono diminuiti, rispettivamente, del 18% e del 15% (TfL, 2004). Sempre nel primo anno di esercizio, è stata rilevata una notevole variazione del modal split degli utenti del sistema di trasporto londinese, caratterizzata da un incremento, rispetto al 2002, del 38% nell'uso del sistema di trasporto pubblico su gomma, che ha beneficiato maggiormente degli effetti dovuti all'introduzione del road pricing, registrando un aumento di ben 6 punti percentuali della velocità media degli autobus.

Infine, un ultimo aspetto su cui ci si vuole soffermare, è il costo di implementazione e di esercizio del sistema di pricing londinese. L'ammontare investito per l'implementazione del sistema si aggira intorno ai £162 milioni (circa 179,38 milioni di euro), spesi per le misure di gestione del traffico, per l'informazione e la messa in esercizio dell'intero sistema (TfL, 2007a). Per l'anno finanziario 2007/2008 i costi di esercizio del Congestion Charging Scheme (costi di gestione, costi per la pubblicità, costi del sistema di controllo dell'evasione, costi dello staff del TfL) sono stati £131 milioni (circa 145,06 milioni di euro), mentre i ricavi totali, comprensivi anche delle multe, sono stati di £268 milioni, corrispondenti

a circa 296,76 milioni di euro (Transport for London, 2008). Quindi, il rapporto costi di esercizio su ricavi è circa 49%. Bisogna sottolineare, che per legge il ricavo netto derivante dal road pricing deve essere investito all'interno del sistema di trasporto (Transport for London 2008). Se si confronta il sistema londinese con gli schemi di cordon pricing adottati in Norvegia, appare evidente la forte differenza del rapporto tra i costi di esercizio ed ricavi. In realtà, fare un paragone tra i due casi è errato, in quanto i due sistemi nascono con obiettivi completamente diversi e funzionano in maniera altrettanto diversa. Resta valida, tuttavia, l'osservazione riguardante la possibilità di estendere la logica dell'efficienza alla progettazione dell'intero sistema piuttosto che limitarla al solo apparato tariffario.

2.5 Congestion Tax di Stoccolma

L'introduzione del road pricing nella città di Stoccolma presenta numerose analogie con la politica adottata a Londra: infatti, in entrambi i casi il motivo che ha spinto le autorità ad optare per uno schema di tassazione delle strade urbane è stato l'urgente bisogno di ridurre gli elevati livelli di congestione; in entrambi i casi si partiva da una situazione iniziale caratterizzata dalla presenza di un sistema di trasporto collettivo ad elevate prestazioni; infine, in entrambi i casi è stato realizzato il potenziamento del trasporto collettivo contemporaneamente all'adozione della politica di tariffazione.

L'alta concentrazione di attività nel centro della città attirava giornalmente elevati flussi veicolari, che si concentravano nelle strade più importanti. La particolare conformazione geografica della capitale svedese, che sorge su un insieme di isolotti fra il lago Mälaren e il suo emissario, in prossimità del mar Baltico, ha reso impossibile, per ragioni tecniche, economiche e ambientali, la realizzazione di nuove infrastrutture ad alto scorrimento per alleviare la pressione dovuta al traffico. Per avere un'idea di quelli che erano i problemi che affliggevano la mobilità nel centro di Stoccolma, basti pensare che nelle ore di punta la velocità media di un'auto

era più bassa del 60% del limite vigente, mentre la velocità media di un autobus si aggirava intorno ai 12 km/h, cioè era più bassa di quella di una bicicletta (Armelius e Hultkrantz, 2006).

A seguito delle elezioni politiche dell'autunno 2002, il partito dei Social Democratici, i Verdi e i partiti di Sinistra, raggiungono un accordo ottenendo la gestione del governo svedese. Su proposta del partito dei Verdi, il governo decide di introdurre nel centro di Stoccolma uno schema di road pricing per un periodo di prova, nonostante il parere opposto del sindaco e della maggioranza del consiglio comunale della città (Gudmundsson et al., 2009). Come era già accaduto a Londra, anche nel caso di Stoccolma è stato necessario modificare la vigente legislatura per introdurre il road pricing in ambito urbano. Infatti, nel giugno 2004 è stato approvato dal parlamento svedese il *Congestion Tax Bill* (progetto di legge) ed il 17 dello stesso mese è stato emanato il *Congestion Tax Act* (2004:629). Secondo il progetto originale, il periodo di sperimentazione doveva durare 14 mesi, da giugno 2005 fino a luglio 2006.

In previsione di tale sperimentazione, nel 2003, prima ancora che venisse approvata la legge che permettesse di introdurre il road pricing, erano state contattate quattro società per la gara di appalto relativa alla fornitura di sistemi software e servizi operativi. Due di queste società si sono ben presto tirate indietro per ragioni tecniche e sono rimaste, così, in corsa la IBM e la Combitech corporation (società svedese specializzata in sistemi di pagamento automatico). La gara viene vinta da IBM, ma la Combitech intraprende un'azione legale, che si è conclusa con l'assegnazione del contratto all'IBM. A causa del ritardo dovuto a tale ricorso, il periodo di prova viene ridotto da 14 a 7 mesi e l'inizio viene posticipato al 3 gennaio 2006. Nel 2004 la gestione del progetto passa dal comune al Vägverket-Swedish National Road Administration (SRA). Oltre al Vägverket, il progetto ha coinvolto altri organi governativi quali il Ministry of Finance, il Ministry for Industry, Employment and Communications, The National Tax Board, la County Administrative Court e l' Enforcement Service. I particolari avvenimenti di Stoccolma dimostrano come le questioni legate alle politiche di pricing posso andare

ben oltre la sfera politica e coinvolgere anche gli interessi di grandi società private. In una circostanza del genere, un eventuale accordo tra settore pubblico e privato avrebbe comportato un grande vantaggio in termini di sviluppo della ricerca, derivante dalla sinergia delle due parti. Questo non è accaduto nel caso di Stoccolma, dove la presenza di interessi economici di privati ha influito, invece, negativamente sul programma di sperimentazione della politica di pricing.

Gli obiettivi che le autorità svedesi avevano deciso di raggiungere con l'introduzione di una politica così radicale come la congestion tax erano: riduzione del 10-15% del traffico nelle ore di punta, riduzione delle emissioni di biossido di carbonio, ossido di azoto e particolato, miglioramento della qualità ambientale (Vägverket, 2006). Qualche mese prima dell'inizio del periodo di sperimentazione (detto *full-scale trial*), dall'agosto 2005 al luglio 2006, è stata avviata una campagna di potenziamento del trasporto pubblico che ha portato all'introduzione di 16 nuove linee e 197 nuovi autobus, al fine di aumentare le alternative a disposizione dei pendolari diretti verso il centro della città nelle ore di picco. Inoltre, laddove era possibile, è stata aumentata la frequenza nel servizio degli autobus esistenti, della metropolitana e dei treni. Non essendo possibile coprire tutte le spese con i ricavi da traffico, data la limitata durata del periodo di prova, i costi relativi all'introduzione del road pricing e il potenziamento del trasporto pubblico sono stati pagati direttamente dal governo. Gli interventi finalizzati al miglioramento del trasporto pubblico sono stati sospesi contemporaneamente al periodo di prova del road pricing, perché lo scopo del governo era dare ai cittadini l'idea del legame esistente fra le due diverse strategie. Il 17 settembre del 2006 i cittadini sono stati chiamati alle urne per esprimersi, attraverso un referendum, sulla possibilità di sospendere il tentativo di road pricing o adottarlo in maniera definitiva. Il referendum si è concluso con esito positivo, con un margine di vittoria dei sì piuttosto ridotto (51,3%). Dall'agosto 2007 la congestion tax è ritornata attiva.

Lo schema di tassazione attualmente operativo nella capitale svedese è del tipo electronic cordon pricing. Il cordone delimita un'area per lo più

circolare, con un raggio di circa 3 km, che copre il 90% del centro cittadino e all'interno della quale risiede il 96% della popolazione di Stoccolma (Armeliuss e Hultkrantz, 2006). L'implementazione del sistema ha richiesto l'installazione di 18 portali elettronici, posizionati in corrispondenza dell'intersezione del cordone con la rete viaria. Ai flussi di attraversamento sono destinate due strade (Lidingö e Essingeleden), di cui la seconda è sempre gratuita, mentre per la prima il passaggio è gratuito se l'uscita dal centro avviene entro mezz'ora dall'ingresso. La ragione di ciò deriva dal fatto che la suddetta strada rappresenta l'unico collegamento tra l'isola di Lidingö ed il resto della rete stradale nazionale. L'intero sistema è stato progettato in modo tale da avere una certa simmetria: un unico cordone di forma circolare, pedaggio uguale per tutti i punti di accesso ed in entrambe le direzioni, tariffa uguale per il picco del mattino e del pomeriggio (Eliasson, 2008). La congestion tax è applicata ai veicoli registrati in Svezia che entrano ed escono dal centro di Stoccolma dal lunedì al venerdì, dalle 06:30 alla 18:29. L'applicazione cessa durante i giorni festivi e nel mese di luglio. Sono esenti dal pagamento i veicoli di soccorso, quelli militari, quelli registrati all'estero, quelli destinati a persone disabili, le auto diplomatiche, i taxi, gli autobus con peso maggiore di 14 tonnellate, i motocicli ed i veicoli alimentati a metano ed elettrici. Essendo il sistema di pagamento elettronico, sotto ogni portale è presente un display che informa gli utenti sul valore corrente della congestion tax. Questo perché le tariffe sono differenziate in base alla fascia oraria (10SEK-15SEK-20SEK, corrispondenti a 0,96€-1,45€-1,93€); il prezzo massimo si rileva nelle ore di punta del mattino (7:30-8:29) e del pomeriggio (16:00-17:29) ed ammonta a 20 SEK (circa 1,93 €). La registrazione dei veicoli che transitano sotto i portali avviene elettronicamente, senza influenzare i flussi di traffico. La targa dei veicoli che attraversano il cordone viene fotografata e l'informazione viene registrata e conservata per un certo periodo di tempo. Per i veicoli che ne sono dotati, il riconoscimento avviene attraverso la On Board Unit (durante la fase di sperimentazione la Swedish Road Administration aveva provveduto a distribuirne ben 490.000). Alla fine di ogni mese la Swedish Transport Agency invia a

ciascun automobilista l'ammontare relativo ai passaggi effettuati durante un mese. La caratteristica del sistema svedese è che il pagamento viene effettuato solo dopo che è avvenuto il passaggio (e non in anticipo come può essere fatto a Londra o a Milano) ed è inviato direttamente al proprietario del veicolo. Non è, inoltre, possibile pagare ai punti di controllo in corrispondenza dei portali. Il pagamento va effettuato entro un mese dalla notifica inviata dalla Swedish Transport Agency ed il proprietario ne è l'unico responsabile, anche se non ha ricevuto per qualche motivo il bollettivo di versamento. In caso di mancato pagamento viene emessa una multa di 500SEK (circa 48,28€).

La congestion tax è stata pensata per ridistribuire il traffico delle ore di punta nell'arco dell'intera giornata, indurre un modal split più orientato verso modi di trasporto alternativi all'auto e, in minima parte, ridurre il numero degli spostamenti. Per capire la posizione dei cittadini nei confronti del road pricing, prima del periodo di prova, sono stati effettuati dei sondaggi telefonici. Dai dati reperiti, si è rilevato che l'attitudine degli utenti verso il sistema di tariffazione varia con la distribuzione modale: in pratica, gli utenti che già usano il sistema di trasporto pubblico presentano una maggior disponibilità ad accentare il road pricing, mentre gli utenti che si spostano in auto sono tendenzialmente più ostili. Quindi, in un sistema in cui prima dell'introduzione del road pricing vi è già un'alta percentuale di utenti che utilizza il trasporto pubblico, ci si aspetta un livello di accettabilità maggiore (Kottenhoff e Brundell Freij., 2009). Inoltre, il potenziamento del trasporto pubblico realizzato contemporaneamente al periodo di sperimentazione della congestion tax ha contribuito ad una modifica dell'elasticità della domanda a favore del trasporto collettivo. In generale, l'esperienza di Stoccolma dimostra come, nella questione dell'accettabilità delle strategie di pricing, possa rivelarsi utile una fase sperimentale accompagnata da una politica di potenziamento del trasporto pubblico.

L'obiettivo per cui era stata introdotta una tariffazione per entrare ed uscire dal centro di Stoccolma era ridurre del 10-15% il traffico attraversante il cordone; durante il full-scale trial la riduzione dei veicoli

rilevata è stata del 22%, quindi superiore alle aspettative come nel caso di Londra. Tuttavia, nel periodo di transizione, tra la fine della fase sperimentale e l'implementazione definitiva, i livelli di traffico sono tornati ad essere quelli originali. Sempre in riferimento ai dati raccolti durante la sperimentazione, è stata osservata una maggior incidenza della congestion tax sull'ora di punta del pomeriggio (-23% del traffico tra le 16:00 e 18:00) che del mattino (-18% del traffico tra le 7:00 e 9:00). Questo vuol dire la scelta dell'orario di partenza dal lavoro verso casa è meno vincolata rispetto all'orario dello spostamento opposto. Inoltre, anche durante la fascia di morbida (9:00–15:30) si è registrata una riduzione delle auto attraversanti il cordone pari al 22%. Un altro fenomeno osservato, è stata una leggera riduzione del traffico lungo le strade esterne ma comunque vicine al cordone ed un aumento di traffico nelle strade esterne e più lontane dal cordone. Complessivamente, in termini di chilometri percorsi, si è avuta una riduzione del 15%, (Eliasson et al., 2009).

I sette mesi di sperimentazione, che hanno preceduto l'adozione definitiva della congestion tax come politica di gestione della domanda di mobilità, hanno richiesto 14 mesi per la sola fase di pianificazione, il coinvolgimento di 700 persone e un investimento finanziario di 1,9 miliardi di SEK, corrispondenti a poco meno di 0,1 miliardi di euro (Vägverket, 2006). Il ricavo totale raccolto nei sette mesi è stato di 399 milioni di SEK (circa 38,52 milioni di euro). Secondo una stima della Swedish Road Administration, è previsto un costo di esercizio di circa 220 milioni di SEK annui (circa 21,24 milioni di euro). Poiché i ricavi annui stimati sono 840 milioni di SEK (circa 81,10 milioni di euro), il ricavo netto derivante dai pedaggi è di 580 milioni di SEK all'anno, corrispondenti a 56 milioni di euro (Eliasson, 2009).

Gli spunti di riflessioni che offre la congestion tax di Stoccolma sono molteplici. Il primo, come già osservato in precedenza, è che un periodo di sperimentazione combinato sapientemente con interventi di potenziamento del trasporto collettivo può influire positivamente sul consenso popolare. Il secondo è che l'idea di coinvolgere la popolazione attraverso un referendum per l'adozione di una politica così controversa

come quella di pricing è, da una parte, estremamente coraggiosa¹⁴, dall'altra, sintomo di uno spirito democratico difficilmente riscontrabile in contesti politici analoghi. Infine, un po' in contrasto con il sopracitato spirito democratico, bisogna sottolineare che una singolarità del caso svedese è il fatto che la decisione di introdurre il road pricing è stata presa dal governo nazionale e subito dal governo locale, in quanto il comune di Stoccolma è stato forzato ad accettarla nonostante la manifesta contrarietà. Il problema del conflitto tra diversi livelli di governo è una situazione piuttosto frequente nel campo della politica in generale e non solo in quella dei trasporti. Banalmente, l'origine del conflitto è che ciascun livello ha differenti elettori e, quindi, diversi obiettivi. Su tale argomento, un interessante studio è quello condotto da Proost e Sen (2006), che hanno analizzato le possibili inefficienze derivanti dalla presenza di diversi livelli di governo, in un contesto in cui si applicano politiche di pricing.

2.6 Ecopass di Milano

Il 2 gennaio 2008 anche la città di Milano si è dotata di un sistema di road pricing, denominato *Ecopass*, che regola l'accesso alla sua zona centrale. *Ecopass* nasce come un progetto a carattere sperimentale, compreso nel piano d'intervento avviato dal Comune di Milano per la mobilità sostenibile, la tutela dell'ambiente e della salute dei cittadini. I motivi che hanno spinto l'amministrazione ad adottare una misura di pricing all'interno del proprio ambito territoriale sono simili a quelli che in precedenza avevano mosso il sindaco londinese ed il governo svedese: ridurre l'inquinamento, tutelare la salute dei cittadini e migliorare la qualità della vita in città. In particolare, gli obiettivi dichiarati del sistema *Ecopass* sono una riduzione giornaliera del 30% delle polveri sottili nell'area sottoposta alla tariffazione (Cerchia dei Bastioni) ed una

¹⁴ Qualche anno prima un analogo esperimento condotto ad Edimburgo si era concluso con l'esito negativo del referendum.

fluidificazione del traffico attraverso una riduzione del 10% delle auto in ingresso nella stessa zona, con conseguente incremento della velocità dei mezzi di trasporto pubblico (Comune di Milano).

L'introduzione del road pricing nel cuore del capoluogo lombardo non è stata una misura isolata, ma è stata inserita in un ampio programma di pianificazione dei trasporti ed salvaguardia ambientale, che ha previsto altri importanti interventi strutturali quali il potenziamento del trasporto pubblico (incremento giornaliero del 16% delle corse dei mezzi pubblici di superficie), l'estensione della sosta regolamentata, l'aumento delle corsie preferenziali per i mezzi pubblici, la realizzazione di nuove piste ciclabili, l'aumento delle aree verdi ed altre iniziative finalizzate all'efficienza energetica. Avendo inserito l'implementazione della misura di pricing in un ampio programma, la città di Milano si trova ad essere perfettamente in linea con la filosofia adottata da Londra e da Stoccolma. In realtà, le analogie tra il sistema milanese ed, in particolare, quello londinese sono molteplici. Anche nel caso dell'Ecopass, l'adozione della politica di tariffazione è stata preceduta da una fase di studio; infatti, nel marzo 2002 l'Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente (AMA) ha realizzato, su incarico dell'ex sindaco Albertini, uno studio finalizzato a valutare la fattibilità di uno schema di road pricing per la città. Lo studio è stato integralmente pubblicato nel marzo 2006 sul sito dell'Agenzia (Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente, 2002). A partire da un'analisi della mobilità giornaliera all'interno dei confini urbani, sono state definite alcune ipotesi che configurano diversi scenari alternativi per l'implementazione di uno schema di pricing. L'analisi condotta ha permesso di individuare le tre condizioni di base necessarie per l'introduzione del road pricing: possibilità di individuare una linea di cordone urbanisticamente chiara e riconoscibile, possibilità di installare sistemi di controllo lungo le strade urbane, elevata propensione all'utilizzo del mezzo pubblico da parte dei cittadini. Oltre a queste prerogative fondamentali, bisogna verificare l'esistenza della regolamentazione della sosta in maniera diffusa dentro e fuori dall'area sottoposta alla misura, la prevalenza del numero di lavoratori rispetto ai residenti, la possibilità di reinvestimento dei ricavi

per finanziare il trasporto pubblico nonché dell'applicazione di sconti per residenti e particolari categorie.

L'ipotesi progettuale avanzata era quella di uno schema di cordon pricing, per il quale sono stati ipotizzati diversi livelli tariffari e diverse estensioni territoriali (cerchia dei Bastioni, cerchia filoviaria, confini comunali). Tra le varie ipotesi considerate, si è concluso che lo scenario preferibile fosse quello applicato all'area centrale più ristretta, delimitata dalla Cerchia dei Bastioni (l'area attualmente sottoposta al provvedimento), in quanto ad essa corrispondevano i maggiori benefici ed i minori impatti rispetto ad una tariffazione più estesa. In particolare, dalle analisi condotte è emerso che, essendo la Cerchia dei Bastioni tra le tre aree quella meglio servita dal trasporto pubblico, la capacità residua di quest'ultimo avrebbe retto meglio all'impatto dovuto ad un incremento di utenza conseguente all'introduzione del road pricing, mentre critica sarebbe stata l'estensione della tariffa alla cerchia filoviaria o all'intero territorio comunale. Inoltre, la tariffazione limitata alla Cerchia dei Bastioni non avrebbe indotto eccessive trasformazioni urbanistiche con conseguente trasferimento delle attività al di fuori del territorio cittadino. Nelle ipotesi progettuali la tariffa è stata considerata attiva dalle 7.00 alle 19.00 nei soli giorni feriali ed sono stati esclusi dal pagamento i ciclomotori, i motocicli (che non verrebbero riconosciuti dal sistema di telecamere) ed altre categorie, quali taxi, residenti e veicoli di soccorso. In fase studio era stata anche ipotizzata la possibilità di un sistema di road pricing elettronico, data l'elevata diffusione delle apparecchiature Telepass per il pagamento dei pedaggi autostradali. L'investimento necessario ad attrezzare i varchi presenti nella zona della Cerchia dei Bastioni fu stimato pari a 6,2 milioni di euro. Calcolando i ricavi ed i costi di gestione, nell'ipotesi di esenzione per i residenti e tariffa di 3 €, era stato ipotizzato un margine operativo annuo di 67 milioni di euro. I tempi di realizzazione prevedibili erano stati stimati pari a 2 anni a partire dalla definizione dell'area delimitata dal cordone. Nella successiva fase di implementazione, l'idea di utilizzare la tecnologia Telepass per la riscossione automatica del pedaggio è stata abbandonata, in quanto si è optato per altre modalità di

pagamento, e si è preferito installare soltanto telecamere di controllo (molte delle quali erano già in funzione per verificare gli accessi alle corsie preferenziali).

Per quanto riguarda l'aspetto della fattibilità legislativa, il progetto Ecopass ritrova le sue fonti normative nella Direttiva Europea 2004/35 sulla responsabilità ambientale in materia di prevenzione e riparazione del danno ambientale, basato sul principio "chi inquina paga" (art.1). La direttiva è stata recepita dal Comune di Milano e costituisce la base del Piano della Mobilità Sostenibile, ed ha permesso al Sindaco Letizia Moratti di inquadrare l'Ecopass nell'ambito delle misure di mobilità sostenibile previste a livello europeo. E proprio questo aspetto "ambientale" rappresenta una delle sostanziali differenze tra il sistema milanese e quello londinese. Infatti, mentre a Londra il pagamento è basato sul diritto di accesso al centro cittadino, a Milano il pagamento è basato sulla tipologia di veicolo, in particolare sulla sua attitudine ad inquinare.

Il sistema Ecopass è attualmente operativo nella zona a traffico limitato della Cerchia dei Bastioni. Tale area ricopre una superficie di circa 7 km² e ha una popolazione residente di circa 76.000 persone (secondo i dati del comune relativi al 2001). Il pagamento del ticket Ecopass permette di accedere alla zona per l'intera giornata di validità e senza limiti di ingressi (come nel caso di Londra) dalle ore 7.30 alle ore 19.30, dal lunedì al venerdì e deve essere richiesto dai conducenti dei veicoli inquinanti. L'area interessata dal provvedimento è delimitata da 43 varchi elettronici muniti di telecamera con sistema ANPR (Automatic Number Plate Recognition). Il sistema di controllo rileva le targhe dei veicoli in ingresso e verifica la disponibilità del credito a partire dalla data di attivazione. La particolarità del sistema Ecopass, che lo distingue da tutte le altre politiche di tariffazione attualmente implementate nelle aree urbane, è che le tariffe sono basate sull'attitudine dei veicoli ad inquinare e sono differenziate rispetto alla classe Euro (secondo le Normative Europee Euro0-1-2-3-4-5), all'alimentazione (benzina, diesel, metano, GPL, elettrici), alla presenza di filtri antiparticolato omologati ed al tipo di trasporto a cui il veicolo è adibito (persone o merci). I veicoli alimentati con GPL e metano ed i

veicoli elettrici ed ibridi (Classe I, secondo le categorie Ecopass) hanno accesso libero; non pagano, inoltre, tutti i veicoli a benzina Euro3, 4 e 5, i veicoli diesel (auto, merci, autobus) con filtro antiparticolato omologato, auto diesel Euro5, auto diesel Euro4 senza filtro antiparticolato, veicoli per il trasporto merci diesel Euro4 e 5 senza filtro antiparticolato (Classe II). Le ultime due categorie sono esentate dal pagamento fino al 12 dicembre 2009. Tutti gli altri veicoli pagano una tariffa che può essere di 2€ (Classe III), 5€ (Classe IV) e 10€ (Classe V). Sono esenti dal pagamento della tariffa i mezzi di trasporto pubblico, i mezzi di soccorso e di tutte le forze armate, i veicoli destinati a disabili, i ciclomotori ed i motocicli, i veicoli con targa rilasciata da paesi esteri in cui non è in vigore il sistema di classificazione della Categoria Euro, come definito dalle Direttive Cee/UE, i veicoli commerciali adibiti in via esclusiva e permanente al trasporto di merci alimentari altamente deperibili a temperature controllate dalle ore 10.00 alle ore 16.00. Il ticket Ecopass può essere attivato in anticipo, il giorno stesso o entro il giorno dopo l'ingresso nell'area e può essere giornaliero, multiplo o sotto forma di abbonamento, come accade con il Congestion Charging Scheme di Londra. E sempre in analogia con il caso londinese, le modalità di pagamento sono molteplici: si può acquistare una card ed attivarla telefonicamente, on-line o tramite sms, si può pagare con carta di credito attivando il permesso on-line o telefonicamente o direttamente agli sportelli bancari, si può, infine, richiedere l'addebito permanente in conto corrente. Se si circola nella zona a traffico limitato della Cerchia dei Bastioni senza aver attivato Ecopass entro il giorno successivo all'ingresso, oppure se viene attivato un Ecopass con classe di inquinamento inferiore scatta una sanzione amministrativa che prevede una multa da 70,00€ a 285,00€.

Il sistema di trasporto milanese è continuamente monitorato dall'Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente, che periodicamente pubblica sul sito del Comune di Milano dei rapporti sugli effetti indotti dall'introduzione della politica di pricing. Secondo il primo di tali rapporti (Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente, 2008), dopo soli 21 giorni di applicazione, sono stati registrati un calo del 24,5% del totale dei veicoli

entranti nell'area, una forte variazione nella composizione del parco veicolare in accesso all'area (incremento dei veicoli esenti dal pagamento, cioè quelli di Classe I e II, e riduzione dei veicoli paganti, cioè quelli di Classe III, IV e V), un incremento della velocità commerciale degli autobus superiore a 10 punti percentuali (11,1%) ed un aumento dei passeggeri della metropolitana del 9,1%. Gli introiti complessivi derivanti dai titoli attivati nel solo mese di gennaio sono stati di circa 2,5 M€. Essendo nota la composizione esatta del parco veicolare, è stato possibile effettuare una stima delle emissioni inquinanti da traffico ed è stata calcolata una riduzione delle emissioni, rilasciate dal traffico circolante entro l'area ECOPASS nei 21 giorni di attivazione del provvedimento, di circa il 30% per il PM₁₀ allo scarico (26% sull'intera giornata), del 27% per il PM₁₀ totale (23% sull'intera giornata), del 25% per gli ossidi di azoto (21% sull'intera giornata) e del 50% per l'ammoniaca (40% sull'intera giornata). Analizzando i dati raccolti durante i 12 mesi del 2008 (Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente, 2009), sono stati rilevati una riduzione media annuale del traffico in area Ecopass, rispetto al periodo di riferimento pre-Ecopass, del 16,4%¹⁵, una riduzione del traffico fuori dall'area Ecopass, rispetto alla media 2007, del 3,4%, una riduzione media dell'indice di congestione (rapporto flussi/capacità della rete stradale) del 4,7% ed un aumento della velocità media di deflusso veicolare del 4,0% nell'ora di punta del mattino all'interno dell'area Ecopass, infine, una riduzione annuale media dei veicoli sottoposti al pagamento del 22,8 % (ascrivibile per il 35% allo spostamento fuori dall'area Ecopass dei percorsi, per il 17% alla sostituzione dei veicoli con altri appartenenti alle classi a basse emissioni, per il 48% all'effetto di trasferimento modale). Queste variazioni del traffico veicolare hanno comportato un incremento medio annuale della velocità commerciale del trasporto pubblico di superficie del 6,7% rispetto al periodo di riferimento. La variazione del modal split a favore del trasporto collettivo è stata del +5,7% dei passeggeri trasportati

¹⁵ Analizzando le variazioni mensili, si rileva un picco superiore al 20% nel mese di gennaio dovuto all'effetto novità prodotto dall'introduzione del provvedimento Ecopass.

dal servizio pubblico urbano, corrispondente ad un aumento di circa 35 milioni di passeggeri/anno. Per quanto riguarda gli aspetti ambientali, l'introduzione del provvedimento ha prodotto una riduzione media delle emissioni atmosferiche di PM10 allo scarico da traffico stradale in area Ecopass del 19%.

Ecopass nasce come misura sperimentale di durata annuale, tuttavia l'operatività del provvedimento è stata prorogata prima a tutto il 2009 e, recentemente, a tutto il 2010. Durante i due anni di applicazione, l'amministrazione comunale si è dovuta sottoporre per più di una volta al giudizio della giustizia amministrativa. Infatti, dopo l'entrata in vigore del provvedimento, l'Osservatorio di Milano ha fatto ricorso al Tar ritenendo l'Ecopass una tassa discriminante, che andava a colpire i ceti più deboli, le famiglie a monoreddito, lavoratori stranieri, i pensionati e i piccoli commercianti artigiani. Il ricorso è stato bocciato nel maggio 2008. In netta controtendenza, nel 2009 l'associazione Genitori Antismog insieme alle associazioni ambientaliste (Legambiente, Wwf, Italia Nostra e Aipi-Associazione Italiana Ipertensione Polmonare) ha presentato un ricorso al Tar per annullare alcune parti delle delibere della Giunta Comunale che hanno prorogato alcune esenzioni per tutto il 2009 e allargato le maglie degli ingressi liberi nell'area Ecopass. Il motivo del ricorso è che le delibere riducono drasticamente gli effetti di contenimento dell'inquinamento ed invalidano le finalità del provvedimento. Le diverse motivazioni dei due ricorsi mettono in risalto come, nei due anni di operatività dell'Ecopass, l'atteggiamento dei milanesi nei confronti della politica di pricing sia completamente cambiato, passando da una naturale ostilità iniziale ad una accettazione totale della misura al punto da volerla preservare da qualunque modifica che ne possa ridurre o vanificare l'efficacia.

Sulla base di quanto descritto, una prima osservazione che può essere fatta è che un sistema di riscossione elettronica dei pedaggi si sarebbe ben conciliato la struttura tariffaria non propriamente semplice proposta dal Comune, soprattutto data la diffusione della tecnologia Telepass rilevata dallo studio condotto dall'Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente. Sempre riguardo alla struttura tariffaria, è lecito chiedersi se sia più giusto il

principio “chi inquina paga” (adottato a Milano) oppure il principio “pay as you drive” (alla base di tutte le altre politiche tariffarie analizzate in questo lavoro di ricerca). I numerosi dati forniti dall’Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente dimostrano che il provvedimento Ecopass ha prodotto effetti positivi sia in termini di riduzione del traffico che dell’inquinamento, ma, allo stesso tempo, ha prodotto una variazione del parco veicolare caratterizzata da una riduzione dei veicoli paganti ed un aumento dei quelli esenti. Considerando l’elevato tasso di motorizzazione in Italia (60 auto ogni 100 abitanti, per cui ciascun famiglia dispone di più veicoli) ed i continui incentivi forniti dal Governo Italiano per l’acquisto di nuove auto meno inquinanti, se le tariffe restano inalterate, ci si può attendere un’accelerazione nella variazione della composizione del parco veicolare che porterebbe ben presto il sistema di trasporto milanese in una configurazione di equilibrio con livelli traffico simili a quelli pre-Ecopass. Probabilmente è preferibile una situazione in cui si hanno meno macchine (applicando il principio “pay as you drive”) ad una situazione in cui si hanno meno macchine inquinanti ma più macchine “ecologiche” (applicando il principio “chi inquina paga”). Questo perché un veicolo non soltanto inquina quando circola, ma è causa di ingombro quando sosta e sottrae spazio ai pedoni.

3. MODELLO DI CALCOLO DELLE TARIFFE

3.1 Considerazioni preliminari ed obiettivi del lavoro di ricerca

L'analisi condotta sugli aspetti teorici, attraverso lo studio dello stato dell'arte, e sugli aspetti pratici, attraverso lo studio di alcuni sistemi di tariffazione attualmente operativi in ambito urbano, ha permesso di individuare una serie di problematiche connesse all'implementazione delle politiche di pricing. La prima considerazione che può essere fatta è che, facendo riferimento al classico modello di domanda ad aliquote parziali, l'introduzione di una qualunque tariffa sul modo di trasporto privato può influenzare, in generale, il comportamento degli utenti in corrispondenza del livello della generazione degli spostamenti, della distribuzione, della scelta modale e della scelta del percorso. Se si considera una politica che impone il pagamento per l'accesso ad una parte del centro cittadino, con tariffa costante durante l'arco della giornata (come nel caso del *Congestion Charging Scheme* di Londra), è plausibile ipotizzare che gli effetti maggiori sul comportamento degli utenti si verifichino in corrispondenza della scelta modale e della scelta del percorso (nell'ipotesi di analisi di breve periodo). Tra questi due effetti, il secondo, comporta soltanto uno "spostamento" del problema in termini di congestione, nel senso che l'utente che reagirà alla tariffazione variando il suo percorso andrà semplicemente ad occupare altre strade della rete, lasciando inalterato il numero di veicoli all'interno dell'area urbana. Sicuramente una modifica della configurazione dei percorsi su rete indotta dall'introduzione di una politica di pricing avrà un effetto positivo sull'area sottoposta al vincolo di

pagamento; ma, al tempo stesso, è necessario verificare le eventuali ripercussioni indotte dall'utilizzo dei percorsi alternativi sul resto della viabilità. Più efficace risulta, invece, il primo effetto perché la variazione del modal split a favore dei sistemi di trasporto alternativi all'auto comporta una reale diminuzione dei veicoli presenti su rete, con un guadagno netto ed evidente in termini di riduzione della congestione. E' auspicabile, pertanto, che, a seguito dell'adozione di una politica di pricing come strumento di gestione della domanda di mobilità, sia il primo effetto a prevalere.

Un primo scopo del presente lavoro di ricerca è, quindi, formulare un modello matematico che permetta di calcolare il valore ottimo delle tariffe da applicare in ambito urbano per diverse politiche di pricing e prevedere, sulla base delle caratteristiche della componente domanda e della componente offerta di un dato sistema di trasporto, i possibili effetti sui sopracitati livelli di scelta dell'utente. La corretta previsione degli effetti è fondamentale sia perché si è interessati ad un miglioramento del sistema di trasporto in termini prestazionali, sia perché le misure di pricing possono avere una forte influenza sulla sfera politica. Per capire l'importanza di una corretta previsione degli effetti si pensi al caso londinese: la variazione indotta dall'introduzione del *Congestion Charging Scheme* sul modal split degli utenti del sistema di trasporto, a favore di quello collettivo, dopo un solo anno di esercizio, è stata superiore alle aspettative del Transport for London, comportando un ammontare dei ricavi da traffico inferiore a quello stimato. In tal caso, nonostante l'errata previsione sul comportamento del sistema, all'introduzione della tariffa è stato, comunque, riconosciuto un grande successo, probabilmente proprio perché la riduzione dei livelli di congestione è stata così notevole. Tale successo nella gestione dei trasporti si è automaticamente trasformato in un successo politico con la rielezione del sindaco Keving Livingstone. Diversa è la situazione se il sistema di trasporto, dopo l'introduzione della tariffa, si porta in una configurazione in cui sono variati prevalentemente i percorsi piuttosto che le ripartizioni modali. Il rischio che si corre è, come sottolineato in precedenza, quello di spostare semplicemente il problema

della congestione da una parte all'altra della rete, vedendo così venir meno tutti i potenziali effetti benefici che si possono ottenere con una politica di pricing ben progettata.

Bisogna notare che, in realtà, esiste un'altra dimensione di scelta dell'utente del sistema di trasporto, non citata in precedenza, che può essere alterata attraverso l'introduzione di particolari forme di road pricing: la scelta del tempo di partenza. Questo possibile effetto si verifica quando le tariffe sono modulate rispetto alla fascia oraria, come accade per i sistemi di *cordon pricing elettronico* di Singapore e di Stoccolma. In tal caso, l'utente può reagire alla variazione del costo medio di trasporto non solo cambiando modalità o percorso, ma variando, anche, l'orario dello spostamento. Ovviamente nei sistemi di pricing di tipo *area-based*, come quelli di Londra o Milano, che prevedevano una tariffa unica per l'acquisto di un permesso giornaliero, questo effetto sulla scelta del tempo di partenza diventa irrilevante.

Gli elementi che, in prima analisi, influenzano gli effetti prodotti dall'introduzione di una tariffa sul comportamento di scelta dell'utente all'interno della rete possono essere ricondotti alle due macro-componenti del sistema: domanda di mobilità e offerta di trasporto. Una caratteristica della domanda che sicuramente interviene in questo aspetto è la sua elasticità rispetto al costo medio del trasporto. Per effettuare una stima corretta dell'elasticità della funzione domanda esistono due possibili metodologie: condurre un'analisi sui dati raccolti in un lungo periodo di osservazione (come nel caso del sistema trentennale di pricing di Singapore), oppure, avvalersi di una campagna di indagini SP. Un altro elemento della domanda, che interviene in maniera rilevante nell'influenzare le scelte di viaggio degli utenti, è rappresentato dalla struttura socioeconomica della domanda stessa. Tale struttura è una caratteristica intrinseca del sistema di trasporto, così come accade per l'elasticità, e, pertanto, è un dato di input del problema di progettazione delle tariffe, del quale è necessario prevedere le traiettorie evolutive nel caso di analisi di lungo periodo. Assegnata la struttura socioeconomica della domanda di mobilità, è possibile fare delle analisi per capire quali

sono i parametri che risultano determinanti sugli effetti indotti da una tariffa. Tipicamente, l'elemento più esaminato in letteratura, cui è riconosciuta una notevole influenza, è il *Value Of Time* (VOT), ma ovviamente non è l'unico. Infatti, anche la segmentazione della domanda risulta rilevante per uno studio corretto dei meccanismi di scelta degli utenti. Si pensi, ad esempio, all'importanza che assume una segmentazione dell'utenza rispetto al tempo di permanenza nel sistema quando si progettano tariffe di sosta orarie. Essendo, come sottolineato in precedenza, sia l'elasticità che la struttura socioeconomica della domanda variabili estrinseche alla progettazione, nella fase di calcolo delle tariffe esse potranno essere soltanto stimate, ma non modificate ed ottimizzate come accade, invece, per i parametri del sistema di offerta.

Naturalmente anche questi ultimi intervengono in modo considerevole sui possibili effetti prodotti da una tariffa. La prerogativa degli elementi della topologia dell'offerta è che su di essi è possibile intervenire, in misura più meno o meno accentuata, a seconda degli obiettivi che si vogliono perseguire con la politica dei trasporti adottata. L'analisi degli elementi del sistema di offerta, che influenzano il comportamento dell'utente rispetto all'introduzione di una tariffa, è importante perché può fornire le linee guida nella progettazione del sistema stesso. Un primo parametro, che risulta determinante nella modifica del comportamento di scelta degli utenti, soprattutto a livello di scelta modale, è la presenza di più sistemi di trasporto alternativi al mezzo privato. Infatti, è naturale aspettarsi che il comportamento di un utente, che si trova in un'area urbana servita da un sistema di trasporto collettivo sia su gomma che su ferro, sia diverso da quello di un utente che dispone unicamente di un sistema di trasporto su gomma che, condividendo la rete con le auto, avrà i livelli prestazionali condizionati dalla congestione. In questo secondo caso, è prevedibile attendersi una maggior rigidità del modal split rispetto all'incremento di prezzo prodotto dall'introduzione della tariffa; ma, da un'altra parte, se la politica di pricing risulta realmente efficace nella riduzione della congestione, tanto più marcati ed evidenti saranno i benefici che riceverà il trasporto collettivo stesso. Un secondo elemento

che potrebbe essere condizionante, è il livello di servizio iniziale del trasporto collettivo, tanto più se si decide di utilizzare una parte dei ricavi derivanti dal road pricing per finanziare il trasporto pubblico. Infatti, dallo studio condotto sui sistemi di pricing operativi è emerso che una condizione indispensabile per l'introduzione di una misura di tariffazione in area urbana è la presenza di trasporto collettivo ad elevate prestazioni. A questo punto, bisogna notare che in un sistema di trasporto reale, la distribuzione delle infrastrutture e dei servizi di trasporto, per quanto capillare possa essere, non è mai uniforme all'interno dell'area urbana, determinando così diversi valori di accessibilità tra le varie zone dell'area urbana. Ciò significa che anche la distribuzione delle infrastrutture e dei servizi di trasporto collettivo sull'intero territorio urbano può diventare un elemento di modulazione delle tariffe. Data la naturale asimmetria della distribuzione delle infrastrutture e dei servizi di trasporto all'interno di un'area urbana, il presente lavoro si pone come obiettivo quello di determinare in che modo e in che misura il comportamento degli utenti, dopo l'introduzione del road pricing, possa essere influenzato dall'accessibilità della coppia O-D su cui avviene lo spostamento. In altre parole, oltre ad uno studio globale sulla ripartizione modale della domanda, sarà condotta un'analisi del modal split su ciascuna coppia O-D per capire l'influenza che ha l'accessibilità relativa su ciascuna coppia origine-destinazione.

Fino a questo punto, si è parlato di elementi riconducibili alle due macro-componenti di un sistema di trasporto (domanda e offerta) che possono intervenire quando si introduce una politica tariffaria. In effetti, esiste un terzo elemento, esterno al sistema di trasporto, che può giocare un ruolo fondamentale sull'efficacia di una misura di pricing: l'utilizzo dei proventi derivanti dalla tariffazione. Da sempre in letteratura l'uso dei ricavi da traffico è stato invocato come possibile strumento per ridurre i grandi problemi di accettabilità legati alle politiche di pricing. Le ipotesi proposte in letteratura sono molteplici e vanno dalla riduzione di altre tasse al potenziamento del trasporto collettivo. Ed è su quest'ultimo elemento che si concentra il presente lavoro di ricerca, nel senso che un

ulteriore obiettivo è studiare in maniera scientifica e rigorosa l'effetto prodotto dall'utilizzo dei ricavi da traffico per il potenziamento dei sistemi di trasporto alternativi all'auto, in particolare del trasporto collettivo su gomma. Bisogna osservare che l'utilizzo dei ricavi derivanti dalla tariffazione del sistema privato per finanziare il trasporto pubblico si può esplicitare attraverso l'introduzione di nuovi sistemi o linee, l'incremento delle frequenze o la riduzione del costo del biglietto. Tuttavia, quest'ultimo intervento, sebbene sia il più semplice da realizzare, è quello meno fattibile perché le tariffe del trasporto pubblico, per ragioni politiche e sociali, sono già le più basse possibili, per cui si potrebbe incorrere in problemi di violazione del vincolo di budget; inoltre, in alcuni casi (come nella Regione Campania) sono vincolate ad un sistema di integrazione tariffaria su larga scala. Ciò, però, non esclude la possibilità di utilizzare i ricavi per la realizzazione di promozioni a vantaggio delle *utenze deboli* (ad esempio sconti sugli abbonamenti per studenti o pensionati).

In definitiva, l'obiettivo del suddetto lavoro di ricerca è formulare un idoneo modello di calcolo delle tariffe, sviluppare uno strumento di calcolo per l'implementazione del modello su reti di trasporto e verificare l'efficacia di diverse politiche di pricing, attraverso l'uso di diversi indicatori, nonché l'effetto dell'utilizzo dei ricavi da traffico per il potenziamento del trasporto collettivo. Assegnato un sistema di trasporto, ne saranno considerate due diverse configurazioni di equilibrio: una configurazione iniziale, senza alcuna politica tariffaria, coincidente con la configurazione in cui il sistema si porta in maniera naturale attraverso l'interazione tra domanda e offerta (*User Equilibrium*), e una configurazione di progetto, verso cui il sistema viene spinto attraverso le politiche di pricing, che potrà essere ottima (*System Equilibrium*) o sub-ottima a seconda che si utilizzino tariffe di tipo first-best o second-best. Lo strumento di passaggio dalla prima alla seconda configurazione è rappresentato dal modello di progettazione delle tariffe.

Nel presente capitolo sarà formulato il modello di calcolo delle tariffe; in particolare, nei paragrafi 3.2 e 3.3 ne verranno illustrate, rispettivamente, le ipotesi e la struttura; nel paragrafo 3.4 il modello presentato verrà

esplicitato nel caso di elasticità della domanda limitata al livello di scelta modale; infine, nel paragrafo 3.4 verranno illustrati alcuni algoritmi, il cui utilizzo è reso necessario dalla complessità risolutiva del problema. Nel capitolo successivo, saranno, invece, illustrati i risultati ottenuti applicando il modello su una rete test, appositamente costruita, ed alcuni risultati ottenuti applicando il modello su una rete urbana reale.

3.2 Ipotesi del modello

Il modello di progettazione delle politiche di pricing presentato in questo lavoro è stato formulato attraverso un problema di ottimizzazione bilivello, in cui il livello inferiore corrisponde al problema di assegnazione multimodale, il livello superiore all'ottimizzazione delle tariffe. L'assegnazione multimodale costituisce il modello di simulazione del sistema di trasporto e permette di calcolare i flussi su rete per ogni modalità considerata nonché le prestazioni per ciascun elemento del sistema di offerta. Il modello di assegnazione multimodale utilizzato è quello proposto da D'Acerno et al. (2002).

Come sottolineato in precedenza, l'attenzione sarà fissata su una configurazione iniziale del sistema di trasporto che verrà perturbata con una politica di pricing, in modo da spostare il sistema verso una configurazione ottima o sub-ottima dal punto di vista del benessere sociale. Non essendo di rilevante interesse ai fini della ricerca in esame il processo dinamico che porta il sistema dall'una all'altra configurazione, il modello di assegnazione sarà di equilibrio. Dalla letteratura è noto che il problema dell'equilibrio delle reti di trasporto può essere formulata attraverso un problema di punto fisso, ovvero con modelli ricavati dalla teoria delle disequazioni variazionali o dell'ottimizzazione. In questo caso viene utilizzato l'approccio del *problema di punto fisso*, ottenuto combinando i modelli di domanda ed di offerta. Per il modello di domanda viene adottata la formulazione analitica, nota come *modello a quattro stadi*, che permette di ottenere il numero medio di spostamenti (in un'assegnata fascia oraria, per un dato motivo dello spostamento e per

ciascuna classe di utenti) come prodotto di quattro sottomodelli: *modello di emissione*, *modello di distribuzione*, *modello di scelta modale* e *modello di scelta del percorso*. In base ad alcune caratteristiche dei modelli di domanda ed offerta utilizzati, i modelli di assegnazione possono essere classificati in vari modi. Un'importante distinzione che può essere fatta, rispetto alle ipotesi con cui è stato formulato il modello di domanda, è tra modelli di *assegnazione con domanda rigida* e *modelli di assegnazione con domanda elastica*, a seconda che i flussi di domanda siano dipendenti o meno dalle variazioni dei costi dovute alla congestione presente nella rete. In particolare, nel caso di modelli a domanda rigida, la dipendenza dei flussi di domanda rispetto ai costi è limitata alla sola scelta del percorso, mentre nei modelli a domanda elastica tale dipendenza interessa anche i livelli di scelta superiori. Poiché in questa sede si sta formulando un modello di progettazione delle tariffe al fine di modificare il comportamento degli utenti sui vari livelli di scelta, attraverso una variazione del costo medio del trasporto, il modello di assegnazione è a domanda elastica.

Per quanto riguarda il comportamento degli utenti rispetto alla scelta del percorso, questo è ipotizzato sia di tipo *preventivo-adattivo* che di tipo puramente *preventivo*, a seconda della modalità di trasporto che viene scelta. In generale, il comportamento di tipo preventivo-adattivo è attribuito agli utenti che all'interno della rete decidono di effettuare lo spostamento con il trasporto collettivo, supponendo quest'ultimo dotato di frequenze sufficientemente elevate da adottare un approccio per linee. Il comportamento di tipo puramente preventivo è attribuito agli utenti che utilizzano le modalità auto e pedonale. Di conseguenza, si parlerà di *modello di scelta degli ipercammini* in riferimento al trasporto pubblico e *modello di scelta del percorso* per le altre modalità.

Fatta eccezione per i servizi di trasporto collettivo che si muovono in sede propria (linee su ferro), per gli altri servizi (linee su gomma) l'interazione derivante dalla condivisione delle infrastrutture con il trasporto privato viene considerata attraverso la formulazione di funzioni di costo della rete del trasporto pubblico che dipendono dai flussi di arco

della rete del trasporto privato (*congestione incrociata*). Pertanto, nella rete del trasporto collettivo saranno formulate funzione di costo diverse per gli *archi promiscui* (risentono della congestione incrociata) e per gli *archi non promiscui* (non risentono della congestione incrociata). Contemporaneamente, le frequenze delle linee del trasporto su gomma andranno a definire il precarico della rete di trasporto privato. Inoltre, per qualunque tipologia di trasporto pubblico, sia su ferro che su gomma, il tempo di attesa alle fermate è supposto indipendente dal numero di utenti che salgono e/o scendono dai mezzi e funzione unicamente delle frequenze e della regolarità dei servizi offerti. Pertanto, il fenomeno della congestione (dipendenza, all'interno di una stessa rete, dei costi di arco dai flussi di arco) è limitata alla rete di trasporto privato; le reti relative al trasporto collettivo e al trasporto pedonale sono, invece, supposte non congestionate (costanza, all'interno di una stessa rete, dei costi di arco rispetto ai flussi di arco).

Avendo in precedenza sottolineato l'importanza della segmentazione della domanda nel problema delle politiche di pricing, il modello di assegnazione multimodale sarà anche multiutente, dove gli utenti di ciascuna classe condividono tutte le caratteristiche comportamentali, quali specificazione, parametri e attributi socioeconomici dei modelli di scelta.

Per quanto riguarda le prestazioni delle reti, non vengono considerati vincoli di capacità per nessun sistema di trasporto. Infine, per la simulazione dei meccanismi di scelta degli utenti, sono utilizzati modelli comportamentali basati sulla teoria dell'utilità casuale.

3.3 Modello di calcolo delle tariffe

Come è noto in letteratura, una rete di trasporto può essere modellizzata attraverso la teoria dei grafi. In particolare, si definisce *rete* un grafo ai cui archi è associata una caratteristica quantitativa; si definisce *grafo* $G=(N, L)$ la coppia ordinata costituita dall'insieme N dei nodi ed dall'insieme L delle coppie di nodi appartenenti ad N , dove ciascuna coppia definisce un *arco* della rete. I grafi utilizzati per le reti di trasporto sono in genere

orientati, ovvero gli archi hanno un verso e le coppie di nodi che li definiscono sono coppie ordinate. Inoltre, ciascun arco del grafo corrisponde ad una fase dello spostamento, ad esempio alla percorrenza di un tronco stradale o all'attesa ad una fermata; analogamente, un nodo del grafo corrisponde ad una transizione tra due fasi, ad esempio all'attraversamento di un'intersezione. A ciascun arco è possibile associare il valore del flusso veicolare che lo attraversa nonché una funzione di impedenza (*funzione di costo*), che esprime il consumo¹⁶ delle risorse (tempo, costo monetario, etc.) associato all'attraversamento dell'arco. Se la rete di trasporto è multimodale è possibile definire per ciascuna modalità $m \in M$ (dove M è l'insieme di tutti i modi disponibili) un sottoinsieme $G_m = (N_m, L_m)$ del grafo della rete, con $N_m \subseteq N$ e $L_m \subseteq L$.

Il grafo costituisce il modello topologico dell'offerta di un sistema di un trasporto. Il modello matematico che definisce l'offerta è costituito da un'insieme di relazioni che esprimono la dipendenza esistente tra costi di arco e flussi di arco (*modello di congestione*), costi di percorso e costi di arco (*modello di calcolo dei costi di percorso*), flussi di arco e flussi di percorso (*modello di propagazione dei flussi*). Nell'ipotesi di rete multimodale e multiutente e di congestione incrociata, le funzioni di costo che definiscono il modello di congestione avranno la seguente espressione¹⁷:

$$\mathbf{c}_m^i = \mathbf{c}_m^i(\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_m, \dots, \mathbf{f}_n) \quad (3.1)$$

dove:

\mathbf{c}_m^i è il vettore dei costi di arco relativo alla classe di utenti i e alla modalità m , di dimensione $(n_{\text{ArchiModom}} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il costo generalizzato percepito da un utente

¹⁶ Il consumo di tutte le risorse impiegate nell'attraversamento di un arco viene espresso attraverso il costo generalizzato, dato dalla somma delle diverse voci di costo omogeneizzate attraverso l'uso di opportuni coefficienti.

¹⁷ Tutte le grandezze sono definite in riferimento allo stesso intervallo di tempo h .

- della classe i che attraversa un arco l della rete con il modo m ;
- \mathbf{f}_m è il vettore dei flussi di arco relativo alla modalità m , di dimensione $(n_{ArchiModom} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il flusso totale che attraversa un arco l della rete con il modo m ; tale vettore può essere calcolato usando la relazione
- $$\mathbf{f}_m = \sum_i \mathbf{f}_m^i ;$$
- \mathbf{f}_m^i è il vettore dei flussi di arco relativo alla classe di utenti i e alla modalità m , di dimensione $(n_{ArchiModom} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il flusso della classe i di utenti che attraversa un arco l della rete con il modo m .

Come sottolineato in precedenza, è lecito ipotizzare un comportamento di tipo preventivo-adattivo per gli utenti che utilizzano il trasporto collettivo e di tipo puramente preventivo per gli utenti che utilizzano l'auto o si spostano a piedi. Nel seguito del paragrafo, si parlerà, per semplicità discorsiva, di flussi e costi di percorso relativi alla generica modalità m ; naturalmente, quando la modalità m corrisponde al trasporto collettivo, i suddetti flussi e costi sono riferiti non più ai percorsi ma agli ipercammini. Questa semplificazione è resa possibile dal fatto il modello di offerta può essere descritto formalmente dallo stesso apparato di relazioni, sia nell'ipotesi di comportamento preventivo che di comportamento preventivo-adattivo.

Il modello di calcolo dei costi di percorso permette di definire i costi dei percorsi, per ciascuna classe utenti e per ciascuna modalità, come somma di due aliquote, corrispondenti rispettivamente ai costi additivi e ai costi non additivi, secondo la relazione:

$$\mathbf{C}_m^i = \mathbf{A}_m^T \mathbf{c}_m^i(\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_m, \dots, \mathbf{f}_n) + \mathbf{C}_{m,i}^{NA} \quad (3.2)$$

dove:

\mathbf{C}_m^i è il vettore dei costi generalizzati di percorso relativo alla classe

di utenti i e alla modalità m , di dimensione $(n_{PercorsiModom} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il costo generalizzato percepito da un utente della classe i che utilizza il percorso k della rete con il modo m ;

\mathbf{A}_m^T è la trasposta della matrice di incidenza archi-percorsi¹⁸ per la modalità m , di dimensione $(n_{ArchiModom} \times n_{PercorsiModom})$, il cui generico elemento $a_{l,k}^m = 1$ se l'arco l appartiene al percorso k , o altrimenti.

$\mathbf{C}_{m,i}^{NA}$ è il vettore dei costi di percorso non additivi relativo alla classe di utenti i e alla modalità m , di dimensione $(n_{PercorsiModom} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il costo, che per un utente della classe i che utilizza il modo m , dipende solo dal percorso k utilizzato.

Infine, il modello di propagazione dei flussi permette di calcolare, per ciascuna classe utenti e per ciascuna modalità, i flussi di arco a partire dai flussi di percorso, secondo la relazione:

$$\mathbf{f}_m^i = \mathbf{A}_m \mathbf{F}_m^i \quad (3.3)$$

dove:

\mathbf{F}_m^i è il vettore dei flussi di percorso relativo alla classe di utenti i e alla modalità m , di dimensione $(n_{PercorsiModom} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il flusso della classe i di utenti che utilizza il percorso k della rete con il modo m .

Il *modello di domanda* può essere definito come una relazione

¹⁸ Si parla di matrice di incidenza archi-percorsi nell'ipotesi di comportamento di scelta di tipo preventivo. Nell'ipotesi di comportamento di tipo preventivo-adattivo tale matrice è sostituita dalla matrice di incidenza archi-iperammini B, il cui generico elemento $b_{l,h}$ rappresenta la probabilità di attraversamento dell'arco l all'interno dell'iperammino h .

matematica che consente di associare ad un dato sistema di attività e di offerta di trasporto il valore medio del flusso di domanda in un determinato periodo di riferimento. I modelli di domanda comunemente utilizzati in letteratura derivano dalla teoria dell'utilità aleatoria¹⁹, basata sul paradigma del decisore razionale, secondo cui ciascun utente è massimizzatore della propria utilità. Generalmente l'utilità associata ad ogni scelta di viaggio è una funzione lineare del costo generalizzato del trasporto. Il modello di domanda può essere formalmente espresso attraverso la seguente relazione matematica:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_m^i &= \mathbf{A}_m \mathbf{F}_m^i = \\ &= \mathbf{A}_m \mathbf{P}_m^i (-\mathbf{C}_m^i) \mathbf{d}_m^i (\mathbf{C}_1^1, \dots, \mathbf{C}_1^i, \dots, \mathbf{C}_1^g, \dots, \mathbf{C}_m^1, \dots, \mathbf{C}_m^i, \dots, \mathbf{C}_m^g, \dots, \mathbf{C}_n^1, \dots, \mathbf{C}_n^i, \dots, \mathbf{C}_n^g) \end{aligned} \quad (3.4)$$

dove:

\mathbf{P}_m^i è la matrice di probabilità di scelta dei percorsi relativa agli utenti della classe i e al modo m , nota anche come *mappa di scelta del percorso*, di dimensione $(n_{\text{PercorsiModom}} \times n_{\text{CoppieOD}})$, il cui generico elemento $P_{k,od}^{m,i}$ esprime la probabilità che un utente della classe i spostandosi tra la coppia origine-destinazione od con il modo m scelga il percorso k ; tale matrice è generalmente funzione del vettore \mathbf{C}_m^i dei costi generalizzati di percorso;

\mathbf{d}_m^i è il vettore di domanda relativo alla classe di utenti i e alla modalità m , di dimensione $(n_{\text{CoppieOD}} \times 1)$, il cui generico elemento $d_{k,od}^{m,i}$ esprime il numero medio di utenti della classe i che si spostano tra la coppia origine-destinazione od con il modo m ; nell'ipotesi di domanda elastica tale vettore è funzione del vettore \mathbf{C}_m^i dei costi generalizzati di percorso, altrimenti è costante.

¹⁹ Per una descrizione dettagliata della teoria dell'utilità aleatoria si rimanda al capitolo tre di Cascetta (2001).

Combinando le equazioni (3.2) e (3.4), si ottiene il ben noto *modello di assegnazione* formulato come *problema di punto fisso* (Cantarella, 1997):

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{f}}_m &= \sum_i \bar{\mathbf{f}}_m^i = \\ &= \sum_i \mathbf{A}_m \mathbf{P}_m^i \left(-\mathbf{A}_m^T \mathbf{c}_m^i(\bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) - \mathbf{C}_{m,i}^{NA} \right) \mathbf{d}_m^i \left(-\mathbf{A}_1^T \mathbf{c}_1^1(\bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) + \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{C}_{1,1}^{NA}, \dots, -\mathbf{A}_m^T \mathbf{c}_m^i(\bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) - \mathbf{C}_{m,i}^{NA}, \dots, -\mathbf{A}_n^T \mathbf{c}_n^g(\bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) - \mathbf{C}_{n,g}^{NA} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

dove:

$\bar{\mathbf{f}}_m$ è il vettore di dei flussi di arco relativo alla modalità m nella configurazione di equilibrio dell'utente (UE).

$\bar{\mathbf{f}}_m^i$ è il vettore di dei flussi di arco relativo alla classe di utenti i e modalità m nella configurazione di equilibrio dell'utente (UE).

Utilizzando la relazione (3.5), è possibile formulare il modello di calcolo delle tariffe come un problema di ottimizzazione multilivello vincolato, in cui il problema di punto fisso sopra descritto rappresenta uno dei vincoli. Volendo fornire un trattazione generale, che consenta il calcolo sia di tariffe di tipo first-best che di tipo second-best, sia di parking che di road pricing, si assumono come variabili di progetto il vettore \mathbf{y} dei pedaggi di arco ed il vettore \mathbf{Y} delle tariffe imponibili sulle coppie OD²⁰ (generalizzazione delle tariffe di sosta). Applicando il principio economico del *Marginal Social Cost Pricing*, che impone la massimizzazione del Social Surplus, il modello di calcolo delle tariffe può essere così formulato:

$$[\hat{\mathbf{y}}, \hat{\mathbf{Y}}] = \arg \min_{\mathbf{y} \in S_y; \mathbf{Y} \in S_Y} Z(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) \quad (3.6)$$

soggetto a:

²⁰ Sia i pedaggi che le tariffe sulle coppie origine-destinazione sono, naturalmente, imposte ai solo utenti della modalità auto.

$$[\bar{\mathbf{f}}_1, ..., \bar{\mathbf{f}}_m, ..., \bar{\mathbf{f}}_n] = \Lambda(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, ..., \bar{\mathbf{f}}_m, ..., \bar{\mathbf{f}}_n) \quad (3.7)$$

$$\mathbf{f}_m \in S_{f_m} \quad \forall m \in \{1, ..., n\} \quad (3.8)$$

dove:

- \mathbf{y} è il vettore dei pedaggi di arco, di dimensione ($n_{ArchiModoAuto} \times 1$), il cui generico elemento y_l rappresenta il pedaggio imposto sull'arco l ;
- \mathbf{Y} è il vettore delle tariffe sulle coppie origine-destinazione, di dimensione ($n_{CoppieOD} \times 1$), il cui generico elemento Y_{OD} rappresenta la tariffa imposta sulla coppia OD;
- $\hat{\mathbf{y}}$ valore ottimo del vettore \mathbf{y} ;
- $\hat{\mathbf{Y}}$ valore ottimo del vettore \mathbf{Y} ;
- S_y insieme di ammissibilità²¹ del vettore \mathbf{y} ;
- S_Y insieme di ammissibilità del vettore \mathbf{Y} ;
- Z funzione obiettivo da minimizzare, uguale all'opposto del Social Surplus;
- Λ funzione di assegnazione multimodale, che esprime il problema di punto fisso (3.5);
- S_{f_m} insieme di ammissibilità del vettore di flusso \mathbf{f}_m ;

L'equazione (3.7) rappresenta il vincolo di assegnazione multimodale, che fornisce il vettore dei flussi di equilibrio $(\bar{\mathbf{f}}_1, ..., \bar{\mathbf{f}}_m, ..., \bar{\mathbf{f}}_n)$ per tutti i modi di trasporto, come funzione delle variabili di progetto (\mathbf{y} e \mathbf{Y}) e dei flussi stessi $(\bar{\mathbf{f}}_1, ..., \bar{\mathbf{f}}_m, ..., \bar{\mathbf{f}}_n)$. Bisogna notare che rispetto ai modelli di assegnazione multimodali proposti in letteratura, il modello, formulato da

²¹ La necessità di definire un insieme di ammissibilità per le tariffe deriva dal fatto che esse, come è intuibile, sono vincolate ad essere maggiori di un valore minimo (tipicamente 0, in quanto non possono essere negative) ed minori di un valore massimo, per motivi di natura politica e sociale.

D'acerno et. al (2002) ed utilizzato in questo lavoro di ricerca come vincolo del problema di ottimizzazione dei pedaggi, considera il fenomeno della congestione incrociata, a causa della quale una variazione del flusso nel sistema di trasporto privato produce una variazione dei tempi di percorrenza del trasporto pubblico su tutti gli archi condivisi dalle due modalità. Questa circostanza produce delle complicazioni teoriche poiché non sono più verificate alcune ipotesi che garantiscono l'esistenza²² e l'unicità della soluzione del problema proposto da Cantarella (1997). Il vincolo (3.8) definisce la congruenza dei flussi di equilibrio con la domanda e l'offerta di trasporto. La funzione obiettivo è l'opposto del Social Surplus e può essere calcolata come la somma algebrica dell'User Surplus (UE), dei Ricavi da Traffico (RT), dei Costi del Sistema (CS) e dei Costi Esterni (CE), secondo la seguente relazione:

$$Z(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n^h) = -US(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) - RT(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) + CS(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) + CE(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) \quad (3.9)$$

L'User Surplus è un indicatore del benessere degli utenti del sistema di trasporto e rappresenta l'utilità netta derivante dalle scelte di viaggio effettuate. Utilizzando i modelli di utilità aleatoria, tale indicatore è uguale al valore medio della massima utilità percepita, noto in letteratura come variabile EMPU (*Expected Maximum Perceived Utility*) o più semplicemente variabile *soddisfazione*. Se si considera il classico modello di domanda a quattro stadi, la sequenza delle scelte effettuate dagli utenti della classe i per un assegnato motivo s sarà: effettuazione di x spostamenti, verso la destinazione d , con il modo m , seguendo il percorso k . Ciascun utente²³

²² Per lo studio delle proprietà teoriche e dell'esistenza e dell'unicità della soluzione del modello di assegnazione multimodale utilizzato si rimanda a D'Acerno et al., 2005.

²³ Si ricorda che, per ipotesi, gli utenti di ciascuna classe condividono tutte le caratteristiche comportamentali, quali specificazione, parametri e attributi socio-economici dei modelli di scelta.

della classe i , nell'effettuare la sua sequenza di scelte, percepisce un'utilità U_{xdmk}^i pari a:

$$U_{xdmk}^i = V_{xodmk}^i + \varepsilon_{xodmk}^i \quad (3.10)$$

U_{xdmk}^i è l'utilità percepita associata alla sequenza di scelte ($xodmk$) ed è, per ipotesi, una variabile aleatoria;

V_{xodmk}^i è l'utilità sistematica associata alla sequenza di scelte ($xodmk$) e rappresenta il valore atteso dell'utilità percepita dagli utenti della classe i ;

ε_{xodmk}^i è residuo aleatorio e rappresenta lo scostamento dell'utilità percepita dall'utilità sistematica; a seconda delle ipotesi fatte sulla sua distribuzione è possibile definire diverse famiglie di modelli.

Per il generico utente della classe i che si trova nella zona o ed effettua la sequenza di scelte ($xodmk$), la variabile soddisfazione è pari a:

$$S_o^i = E \left[\max_{xdmk} U_{xodmk}^i(xdmk) \right] \quad (3.11)$$

Nel caso specifico di modelli di utilità aleatoria appartenenti alla famiglia Logit, è cioè di residui aleatori identicamente ed indipendentemente distribuiti come una variabile Gumbel di parametro ϑ , la variabile soddisfazione può essere espressa in forma chiusa attraverso la ben nota relazione:

$$S_o^i = \vartheta \ln \sum_{xdmk} \exp(V_{xodmk}^i / \vartheta) \quad (3.12)$$

L'User Surplus può essere, pertanto, ottenuto estendendo il calcolo a tutte le classi di utenti e a tutte le zone di traffico del sistema di trasporto:

$$US(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) = \sum_i \sum_o (N_o^i) \cdot S_o^i(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) \quad (3.13)$$

dove:

N_o^i Numero di utenti della classe i presenti nella zona o .

Il secondo ed il terzo termine nell'espressione del Social Surplus sono, rispettivamente, l'ammontare dei ricavi da traffico, derivanti sia dal trasporto privato che dal trasporto pubblico, e l'ammontare dei costi di gestione dell'intero sistema. Quest'ultimo è pari alla somma dei costi di esercizio del trasporto pubblico, i quali sono funzione dei parametri prestazionali del rete del collettivo, e dei costi di esercizio del sistema di pricing, supposti costanti rispetto ai flussi della rete auto.

$$RT(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) = \sum_m \sum_i \mathbf{y}^T \cdot \bar{\mathbf{f}}_m^i(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) + \mathbf{Y}^T \cdot \mathbf{d}_{auto}(\mathbf{y}, \mathbf{Y}) \quad (3.14)$$

dove:

\mathbf{d}_{auto} è il vettore domanda relativo alla modalità auto, di dimensione ($n_{coppieOD} \times 1$), il cui generico elemento d_{od} rappresenta il numero medio di utenti che si spostano in auto tra l'origine o e la destinazione d .

$$CS(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) = COSTC(PPSTC) + COSP \quad (3.15)$$

dove:

$COSTC$ sono i costi operativi del sistema di trasporto collettivo, funzione dei parametri prestazionali $PPSTC$;

$COSP$ sono i costi operativi del sistema di pricing, supposti costanti rispetto ai flussi della rete e funzione della tipologia del sistema di riscossione delle tariffe.

L'ultimo termine che compare nell'espressione del Social Surplus rappresenta l'ammontare dei costi esterni ed è funzione dei flussi nonché delle tariffe imposte sulla rete:

$$CE(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) = CE^*(\mathbf{y}, \mathbf{Y}, \bar{\mathbf{f}}_1^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m^h, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n^h) \quad (3.16)$$

In letteratura esistono diversi riferimenti per la stima costi esterni, come ad esempio Gallo (2006, 2007).

3.4 Esplicitazione del modello nel caso di elasticità limitata alla scelta modale

Per la definizione del vincolo di assegnazione multimodale è possibile utilizzare il classico *modello di domanda a quattro stadi*, che permette di calcolare, per un fissato motivo s dello spostamento ed un dato periodo di tempo h , il numero medio di spostamenti per ciascuna classe di utenti i , da ciascuna origine o , verso ciascuna destinazione d , utilizzando ciascuna modalità m e seguendo ciascun percorso k , attraverso una successione di quattro sottomodelli (*modello di emissione*, *modello di distribuzione*, *modello di scelta modale*, *modello di scelta del percorso*), secondo la relazione²⁴:

$$d_{od}^i[m, k] = n^i[o] \sum_x p^i[x/o](\mathbf{SE}, \mathbf{T}) \cdot p^i[d/o](\mathbf{SE}, \mathbf{T}) \cdot p^i[m/od](\mathbf{SE}, \mathbf{T}) \cdot p^i[k/odm](\mathbf{SE}, \mathbf{T}) \quad (3.17)$$

dove:

$d_{od}^i[m, k]$ è il numero di utenti della classe i che, per il fissato motivo s e nella data fascia oraria h , partono

²⁴ Nella relazione sono sottintesi gli apici s ed h relativi rispettivamente al motivo dello spostamento e alla fascia orario di riferimento.

	dall'origine o , verso la destinazione d , utilizzando la modalità m e seguendo il percorso k ;
$n^i[o]$	è il numero di individui della categoria i che si trovano nella zona di origine o ;
SE	è il vettore delle variabili socioeconomiche che influenzano le scelte di viaggio degli utenti;
T	è il vettore delle variabili che definiscono il livello di servizio del sistema di offerta;
$p^i[x/o](SE, T)$	è il <i>modello di emissione</i> o frequenza degli spostamenti e fornisce la percentuale di individui della categoria i che, trovandosi in o , effettuano x spostamenti, per il fissato motivo s e nella data fascia oraria h ;
$p^i[d/o](SE, T)$	è il <i>modello di distribuzione</i> e fornisce la percentuale di individui della categoria i che, spostandosi dall'origine o , per il fissato motivo s e nella data fascia oraria h , si recano alla zona di destinazione d ;
$p^i[m/od](SE, T)$	è il <i>modello di scelta modale</i> e fornisce la percentuale di utenti della categoria i che, spostandosi fra l'origine o e la destinazione d , per il fissato motivo s e nella data fascia oraria h , utilizzano il modo di trasporto m ;
$p^i[k/odm](SE, T)$	è il <i>modello di scelta del percorso</i> e fornisce la percentuale di utenti della categoria i che, spostandosi fra l'origine o e la destinazione d , per il fissato motivo s e nella data fascia oraria h , con il modo m , utilizza il percorso k .

Se si effettua un'analisi di breve periodo, si può assumere che l'introduzione di una politica di pricing lasci sostanzialmente inalterati i livelli di emissione e di distribuzione, potendo in questo modo limitare

l'ipotesi di elasticità alla scelta modale. In questo caso si può utilizzare una versione “ridotta” del modello descritto con cui si assume nota una stima delle matrici Origine-Destinazione attuali per ciascuna categoria di utenti e si simulano esplicitamente solo gli stadi di ripartizione modale e scelta del percorso, secondo la relazione:

$$d_{od}^i[m, k] = d_{od}^i \cdot p^i[m / od](\mathbf{SE}, \mathbf{T}) \cdot p^i[k / odm](\mathbf{SE}, \mathbf{T}) \quad (3.18)$$

dove:

d_{od}^i è la matrice Origine-Destinazione per la classe di utenti i , relativa al motivo s e alla fascia oraria h .

La dipendenza della ripartizione modale dai costi del trasporto ed, in particolare dalle tariffe imposte con le diverse politiche di pricing, viene considerata nella specificazione del modello di scelta modale attraverso l'utilizzo di adeguati attributi. In particolare, per la classe di utenti i l'utilità sistematica associata alla modalità m sulla coppia origine-destinazione od avrà la seguente espressione:

$$W_{od,m}^i = \sum_j \beta_j^i X_j^i + S_{od,m}^i(\mathbf{V}_m^i) \quad (3.19)$$

$W_{od,m}^i$ è l'utilità sistematica, per la classe di utenti i , associata alla modalità m sulla coppia origine-destinazione od ;

$\sum_j \beta_{m,j}^i X_{m,j}^i$ è la combinazione lineare degli attributi $X_{m,j}^i$ dell'alternativa m (attributi socioeconomici, attributi specifici dell'alternativa, variabili ombra e dei costi propri dell'alternativa), secondo i coefficienti di omogeneizzazione $\beta_{m,j}^i$, per la classe di utenti i ;

$S_{od,m}^i$ è la variabile soddisfazione, per la classe di utenti i , relativa alla scelta dei percorsi²⁵ effettuabili con il modo m sulla coppia origine destinazione od .

V_m^i è il vettore delle utilità sistematiche associate ai percorsi effettuabili con la modalità m , per gli utenti della classe i , di dimensione $(n_{Percorsi} \times 1)$;

In forma compatta, la relazione (3.19) diventa:

$$W_m^i = \bar{W}_m^i + S_m^i (V_m^i) \quad (3.20)$$

dove:

W_m^i è il vettore delle utilità sistematiche della modalità m , per gli utenti della classe i , di dimensione $(n_{CoppieOD} \times 1)$;

\bar{W}_m^i è il vettore delle utilità specifiche della modalità m , per gli utenti di classe i , di dimensione $(n_{CoppieOD} \times 1)$, la cui generica componente $\bar{W}_{od,m}^i$ è la combinazione lineare degli attributi dell'alternativa m (attributi socioeconomici, attributi specifici dell'alternativa, variabili ombra e dei costi propri dell'alternativa), secondo i coefficienti di omogeneizzazione β_j^i , per la classe di utenti i , ovvero $\bar{W}_{od,m}^i = \sum_j \beta_{m,j}^i X_{m,j}^i$;

S_m^i è il vettore delle variabili soddisfazioni associate ai percorsi della modalità m , per gli utenti della categoria i , di dimensione $(n_{CoppieOD} \times 1)$, la cui generica componente è $S_{od,m}^i$.

²⁵ Per quanto specificato nel paragrafo precedente, la variabile soddisfazione è relativa alla scelta del percorso se la modalità m è quella privata o con quella pedonale, alla scelta dell'ipercammino se la modalità m è quella collettiva.

La generica componente del vettore \mathbf{S}_m^i , cioè la variabile soddisfazione $S_{od,m}^i$, può essere calcolata in forma chiusa se si utilizza per la scelta dei percorsi un modello di tipo Logit, utilizzando la relazione:

$$S_{od,m}^i = \mathcal{G}_m \ln \sum_{k_{od}} \exp(V_{m,k_{od}}^i / \mathcal{G}_m) \quad (3.21)$$

dove:

\mathcal{G}_m è il parametro del modello di scelta del percorso per la modalità m ;

$V_{m,k_{od}}^i$ è l'utilità sistematica, per gli utenti della classe i , associata al percorso k_{od} che collega la coppia origine-destinazione od nella modalità m .

Avendo fatto le ipotesi di congestione incrociata e rete del trasporto privato congestionata, mentre le reti del trasporto collettivo e pedonale sono non congestionate, le utilità sistematiche associate ai percorsi e agli ipercammini hanno la seguente espressione:

$$\mathbf{V}_a^i = -\mathbf{A}_a^T [\mathbf{c}_a^i(\mathbf{f}_a) + \beta_y^i \mathbf{y}] - \mathbf{C}_{a,i}^{NA} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{V}_c^i = -\mathbf{B}^T [\mathbf{c}_c^i(\mathbf{f}_a)] - \hat{\mathbf{B}}^T [\hat{\mathbf{c}}_c^i(\mathbf{f}_a)] - \mathbf{C}_{a,i}^{NA} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{V}_p^i = -\mathbf{A}_p^T [\mathbf{c}_p^i] - \mathbf{C}_{a,i}^{NA} \quad (3.24)$$

dove:

\mathbf{A}_a^T è la trasposta della matrice di incidenza archi-percorsi per la modalità auto, di dimensione $(n_{ArchiAuto} \times n_{PercorsiAuto})$, il cui generico elemento $a_{l,k}^a = 1$ se l'arco l appartiene al percorso k , o altrimenti.

\mathbf{B}^T è la trasposta della matrice di incidenza archi promiscui-

ipercammini di dimensione ($n_{ArchiCollettivoProm} \times n_{PercorsiCollettivo}$), il $b_{l,h}$ rappresenta la probabilità di attraversamento dell'arco promiscuo l all'interno dell'ipercammino h .

$\hat{\mathbf{B}}^T$ è la trasposta della matrice di incidenza archi non promiscui-
ipercammini di dimensione ($n_{ArchiCollettivoNonProm} \times n_{PercorsiCollettivo}$),
il $b_{l,h}$ rappresenta la probabilità di attraversamento dell'arco
non promiscuo l all'interno dell'ipercammino h .

\mathbf{A}_p^T è la trasposta della matrice di incidenza archi-percorsi per la
modalità pedonale, di dimensione ($n_{ArchiPedonale} \times n_{PercorsiPedonale}$),
il cui generico elemento $a_{l,k}^p = 1$ se l'arco l appartiene al
percorso k , o altrimenti.

\mathbf{c}_a^i è il vettore dei costi di arco relativo alla classe di utenti i e alla
modalità auto, di dimensione ($n_{ArchiAuto} \times 1$), il cui generico
elemento esprime il costo percepito da un utente della classe i
che attraversa un arco l della rete del trasporto privato;

\mathbf{c}_c^i è il vettore dei costi di arco associato agli archi promiscui della
rete di trasporto collettivo, relativo alla classe di utenti i e di
dimensione ($n_{ArchiCollettivoProm} \times 1$), il cui generico elemento
esprime il costo percepito da un utente della classe i che
utilizza un arco l promiscuo della rete del trasporto collettivo;

$\hat{\mathbf{c}}_c^i$ è il vettore dei costi di arco associato agli archi non promiscui
della rete di trasporto collettivo, relativo alla classe di utenti i e
di dimensione ($n_{ArchiCollettivoNonProm} \times 1$), il cui generico elemento
esprime il costo percepito da un utente della classe i che
utilizza un arco l non promiscuo della rete del trasporto
collettivo;

\mathbf{c}_a^i è il vettore dei costi di arco relativo alla classe di utenti i e alla
modalità pedonale, di dimensione ($n_{ArchiPedonale} \times 1$), il cui
generico elemento esprime il costo percepito da un utente della
classe i che attraversa un arco l della rete pedonale;

- \mathbf{f}_a è il vettore dei flussi di arco relativo alla modalità auto, di dimensione $(n_{ArchiModom} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il flusso totale che attraversa un arco l della rete del trasporto privato; tale vettore può essere calcolato usando la relazione $\mathbf{f}_a = \sum_i \mathbf{f}_a^i$;
- \mathbf{y} è il vettore dei pedaggi di arco, di dimensione $(n_{ArchiAuto} \times 1)$, il cui generico elemento y_l esprime il pedaggio imposto sull'arco l della rete del trasporto privato;
- β_y^i è il coefficiente di omogeneizzazione del pedaggio;
- $\mathbf{C}_{a,i}^{NA}$ è il vettore dei costi di percorso non additivi relativo alla classe di utenti i e alla modalità auto, di dimensione $(n_{PercorsiAuto} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il costo, che per un utente della classe i che utilizza il modo auto, dipende solo dal percorso k utilizzato.
- $\mathbf{C}_{a,i}^{NA}$ è il vettore dei costi di percorso non additivi relativo alla classe di utenti i e alla modalità collettiva, di dimensione $(n_{PercorsiCollettivo} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il costo, che per un utente della classe i che utilizza il modo collettivo, dipende solo dall'ipercammino percorso h utilizzato.
- $\mathbf{C}_{a,i}^{NA}$ è il vettore dei costi di percorso non additivi relativo alla classe di utenti i e alla modalità pedonale, di dimensione $(n_{PercorsiPedonale} \times 1)$, il cui generico elemento esprime il costo, che per un utente della classe i che utilizza il modo pedonale, dipende solo dal percorso k utilizzato.

3.5 Algoritmi risolutivi

Con il modello formulato nel paragrafo 3.3 il calcolo delle tariffe viene condotto attraverso un problema di ottimizzazione bilivello vincolata, in cui il livello superiore corrisponde all'ottimizzazione delle tariffe, il livello

inferiore all'assegnazione multimodale. La complessità della trattazione rende impossibile una risoluzione del problema in forma chiusa e, pertanto, necessita dell'utilizzo di adeguati algoritmi. Limitando l'ipotesi di elasticità della domanda al livello di scelta modale, il problema dell'assegnazione multimodale comporta la risoluzione di un doppio problema di punto fisso, derivante dalla dipendenza circolare tra flussi e costi (di arco e di percorso) e tra domanda e costi, secondo le relazioni:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{f}}_m &= \sum_i \bar{\mathbf{f}}_m^i = \\ &= \sum_i \mathbf{A}_m \mathbf{P}_m^i \left(-\mathbf{A}_m^T \mathbf{c}_m^i(\bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) - \mathbf{C}_{m,i}^{NA} \right) \mathbf{d}_m^i \left(-\mathbf{A}_1^T \mathbf{c}_1^1(\bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) + \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{C}_{1,1}^{NA}, \dots, -\mathbf{A}_m^T \mathbf{c}_m^i(\bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) - \mathbf{C}_{m,i}^{NA}, \dots, -\mathbf{A}_n^T \mathbf{c}_n^g(\bar{\mathbf{f}}_1, \dots, \bar{\mathbf{f}}_m, \dots, \bar{\mathbf{f}}_n) - \mathbf{C}_{n,g}^{NA} \right) \\ \mathbf{d}_m^i &= \mathbf{d}_m^i \left(\mathbf{c}_1^1(\bar{\mathbf{d}}_1, \dots, \bar{\mathbf{d}}_m, \dots, \bar{\mathbf{d}}_n), \dots, \mathbf{c}_m^i(\bar{\mathbf{d}}_1, \dots, \bar{\mathbf{d}}_m, \dots, \bar{\mathbf{d}}_n), \dots, \mathbf{c}_n^g(\bar{\mathbf{d}}_1, \dots, \bar{\mathbf{d}}_m, \dots, \bar{\mathbf{d}}_n) \right)\end{aligned}$$

dove:

\mathbf{d}_m è il vettore di domanda relativo alla modalità m , di dimensioni $(n_{CoppieOD} \times 1)$, il cui generico elemento $d_{od,m}$ esprime il numero medio di utenti che si spostano tra l'origine o e la destinazione d con il modo m ; tale vettore può essere calcolato usando la relazione $\mathbf{d}_m = \sum_i \mathbf{d}_m^i$, cioè sommando i vettori di domanda relativi a tutte le classi di utenti per la modalità m .

La suddetta doppia dipendenza circolare comporta la definizione di un problema di assegnazione su due livelli. Il livello interno fornisce, per un assegnato valore di domanda, l'equilibrio tra flussi e costi, mediato dal modello del comportamento di scelta del percorso e dalle funzioni di costo; il livello esterno, invece, fornisce l'equilibrio tra i costi risultanti dall'assegnazione di equilibrio (a domanda rigida) ed i flussi di domanda definiti dalle funzioni di domanda.

Il calcolo dei flussi di equilibrio, per una assegnato valore di domanda, può essere condotto utilizzando l'algoritmo MSA (*Method of Successive*

Averages), che genera una successione di vettori ammissibili di flussi di arco, finché non è soddisfatto un fissato criterio di convergenza. Partendo da una soluzione ammissibile iniziale (tipicamente quella ottenuta con i costi calcolati a flusso nullo), l'algoritmo risolve una successione di assegnazioni di carico stocastico della rete con i costi corrispondenti alla soluzione corrente. La soluzione \mathbf{f}^k all'iterazione k è la media delle prime k assegnazioni di carico. L'algoritmo può essere descritto dal sistema di equazioni ricorsive:

$$\begin{aligned}k &= k+1 \\ \mathbf{c}^k &= \mathbf{c}(\mathbf{f}^{k-1}) \\ \mathbf{f}_{SNL}^k &= \mathbf{f}_{SNL}^k(\mathbf{c}^k) \\ \mathbf{f}^k &= \mathbf{f}^{k-1} + (\mathbf{f}_{SNL}^k - \mathbf{f}^{k-1})/k\end{aligned}$$

dove:

- \mathbf{c}^k è il vettore dei costi di arco all'iterazione k ;
- \mathbf{f}^k è il vettore dei flussi di arco all'iterazione k ;
- \mathbf{f}_{SNL}^k è il vettore dei flussi di arco soluzione del carico stocastico della rete all'iterazione k .

Poiché la convergenza è fatta rispetto ai flussi, l'algoritmo è detto MSA-FA (*Flow Averaging*). La sequenza si arresta quando la differenza adimensionalizzata tra i flussi di carico stocastico della rete e la soluzione corrente è inferiore ad una fissata soglia di errore δ :

$$|\mathbf{f}_{SNL}^k - \mathbf{f}^{k-1}| / \mathbf{f}^{k-1} < \delta$$

L'algoritmo MSA-FA permette di calcolare i flussi sulla rete del trasporto privato in corrispondenza di un assegnato valore della ripartizione modale, mentre i flussi di arco sulle reti di trasporto collettivo e pedonale possono essere calcolati con un carico stocastico della rete, avendo ipotizzato queste reti non congestionate.

La convergenza sul secondo livello del problema di assegnazione

multimodale può essere raggiunta utilizzando tre tipologie di algoritmi: algoritmi ad approccio esterno, algoritmi ad approccio interno ed algoritmi ad approccio su iperrete. Con gli *algoritmi ad approccio esterno* si parte da una ripartizione modale iniziale (ad esempio quella corrispondente ai costi calcolati a flusso nullo) ed si calcolano prima i flussi del sistema di trasporto privato, applicando l'algoritmo MSA-FA, quindi i flussi per le modalità collettivo e pedonale con un carico della rete. A questo punto è possibile calcolare le variabili soddisfazione ed aggiornare la ripartizione modale. Questa procedura di aggiornamento della ripartizione modale va ripetuta finché non è soddisfatto un test di arresto. La convergenza sulla ripartizione modale può essere raggiunta applicando l'algoritmo MSA descritto dal seguente sistema di equazioni ricorsive:

$$k=k+1$$

$$\mathbf{S}^k = \mathbf{S}^k(\mathbf{d}_1^{k-1}, \dots, \mathbf{d}_m^{k-1}, \dots, \mathbf{d}_n^{k-1})$$

$$\mathbf{d}_{MSA-AF_m}^k = \mathbf{d}_{MSA-AF_m}^k(\mathbf{S}^k) \quad \text{con } m=1, \dots, n;$$

$$\mathbf{d}_m^k = \mathbf{d}_m^{k-1} + (\mathbf{d}_{MSA-AF_m}^k - \mathbf{d}_m^{k-1})/k \quad \text{con } m=1, \dots, n;$$

dove:

\mathbf{S}^k è la matrice delle variabili soddisfazione all'iterazione k , di dimensioni ($n_{CoppieOD} \times n_{modi}$), il cui generico elemento $S_{od,m}$ è il valore della variabile soddisfazione relativo alla scelta del percorso nella modalità m sulla coppia origine-destinazione od ;

\mathbf{d}_m^k è il vettore domanda relativo alla modalità m all'iterazione k ;

$\mathbf{d}_{MSA-AF_m}^k$ è il vettore domanda relativo alla modalità m ottenuto aggiornando la matrice \mathbf{S}^k dopo aver applicato l'algoritmo MSA-FA, per il calcolo dei flussi per la modalità auto, ed il carico stocastico, per il calcolo delle modalità collettiva e pedonale.

La sequenza si arresta quando la differenza adimensionalizzata tra i flussi di domanda ottenuti dai flussi di equilibrio di tutte le modalità e la soluzione corrente è inferiore ad una fissata soglia di errore δ :

$$\left| \mathbf{d}_{MSA-AF_m^k} - \mathbf{d}_m^{k-1} \right| / \mathbf{d}_m^{k-1} < \delta \quad \text{con } m=1, \dots, n.$$

Con gli *algoritmi ad approccio interno*, si parte con un vettore dei flussi nullo, si calcolano le variabili soddisfazione corrispondenti ai costi a flusso nullo, quindi si determina la ripartizione modale iniziale. Invece di applicare l'algoritmo MSA-FA per il calcolo dei flussi di equilibrio, si effettua semplicemente un carico stocastico della rete per il trasporto privato; aggiornando i costi, sia per la modalità trasporto privato che per quella di trasporto collettivo, è possibile calcolare il nuovo valore delle variabili soddisfazione nonché della ripartizione modale. La procedura continua in maniera iterativa finché i flussi sul trasporto privato non giungono a convergenza. Per avere i flussi per le altre modalità, è sufficiente effettuare un carico stocastico per ciascuna rete. Mentre con gli algoritmi ad approccio esterno si determinano i flussi di equilibrio attraverso l'applicazione dell'algoritmo MSA-FA ogni volta che viene aggiornata la ripartizione modale, con gli algoritmi ad approccio interno l'algoritmo MSA-FA si applica una sola volta e l'aggiornamento della ripartizione modale avviene ad ogni carico stocastico dell'algoritmo stesso.

Gli *algoritmi con approccio su iperrete* si riducono alla soluzione di un problema di assegnazione a domanda rigida su una rete appositamente costruita (l'*iperrete*), in cui la scelta modale è simulata in corrispondenza di archi (fittizi) di diversione modale. Costruita l'*iperrete*, i flussi di equilibrio del trasporto privato vengono calcolati applicando l'algoritmo MSA-FA; per la determinazione dei flussi delle altre modalità occorre effettuare un carico stocastico. Un esempio di modello di iperrete lo si trova in Montella et al. (2001).

Gli algoritmi sopradescritti consentono la risoluzione del problema di assegnazione multimodale a domanda elastica, quindi del livello inferiore

del modello di calcolo delle tariffe. Dato l'elevato numero delle variabili di progetto (pedaggi di arco e tariffe sulle coppie OD), una ricerca esaustiva del loro valore esatto risulta impraticabile e si rende necessario l'utilizzo di adeguati algoritmi euristici. In particolare, per l'ottimizzazione delle tariffe può essere utilizzato l'algoritmo proposto da D'Acierno et al. (2006), articolato nelle seguenti fasi:

- Fase 1: Ottimizzazione Esaustiva Mono-dimensionale;
- Fase 2: Definizione della Soluzione Iniziale;
- Fase 3: Ottimizzazione attraverso la Ricerca di Intorno;
- Fase 4: Test di Arresto o Definizione di una Soluzione Iniziale;

La prima fase consiste in una ricerca monodimensionale esaustiva rispetto a ciascuna variabile del modello, mentre le altre sono supposte costanti (ad esempio uguali a 0). Nella seconda fase viene scelta la soluzione iniziale assegnando a ciascuna variabile il valore ottimo individuato nella fase precedente. A partire dal punto individuato, l'algoritmo ricerca l'ottimo locale nell'intorno della soluzione corrente. Nella quarta fase, il valore ottimo trovato nell'intorno viene confrontato con la soluzione iniziale: se sono differenti, l'algoritmo assume come nuovo punto iniziale la soluzione ottima e ripete le fasi 3 e 4.; se sono uguali, l'algoritmo si arresta e la soluzione corrente corrisponde al minimo locale della funzione obiettivo.

4. APPLICAZIONI DEL MODELLO DI CALCOLO DELLE TARIFFE

4.1 Applicazioni

Il modello di calcolo delle tariffe²⁶ formulato nel capitolo 3 è stato applicato, inizialmente, ad una test appositamente costruita, quindi, ne è stata verificata l'applicabilità su una rete a scala reale. Con il modello proposto possono essere calcolate tariffe riconducibili a diverse strategie di *road* e di *parking pricing*; nel presente lavoro di ricerca è stata posta particolare attenzione su alcune politiche cosiddette *second-best* (sia *road* che *parking pricing*) e, limitatamente al caso della rete test, sulla politica *first-best* che impone un pedaggio su ciascun arco della rete.

La complessità analitica del problema ha reso necessario lo sviluppo di un codice di calcolo in Visual Basic per l'implementazione degli algoritmi risolutivi descritti nel paragrafo 3.5. In particolare, relativamente al livello inferiore del problema di ottimizzazione delle tariffe (assegnazione multimodale a domanda elastica espressa attraverso un problema di punto fisso) sono stati utilizzati l'algoritmo MSA-FA, per la determinazione dei flussi di equilibrio, ed un algoritmo ad approccio esterno, per la determinazione della ripartizione modale di equilibrio. Per livello superiore del problema di ottimizzazione delle tariffe (determinazione del livello tariffario ottimo per ciascuna strategia ipotizzata) è stato utilizzato l'algoritmo meta-euristico proposto da D'Acierno et al. (2006) e descritto

²⁶ Per le applicazioni l'ipotesi di elasticità della domanda è stata limitata alla scelta modale, pertanto è stata utilizzata la specificazione del modello riportata nel paragrafo 3.4.

nel paragrafo 3.5.

Le applicazioni condotte su rete test sono state molteplici. Fissate diverse politiche di pricing, con il modello di calcolo formulato è stato possibile calcolare per ciascuna di esse il valore ottimo delle tariffe ed il corrispondente valore della funzione obiettivo (l'opposto del Social Surplus). Quest'ultimo è stato utilizzato come indicatore dell'efficacia di ciascuna strategia insieme alle percentuali di ripartizione modale. Quindi, per ciascuna misura di pricing, è stato verificato l'effetto prodotto dall'utilizzo dei proventi della tariffazione (secondo diverse percentuali) per il finanziamento del trasporto pubblico. Inoltre, sono state condotte delle applicazioni ipotizzando diversi valori del livello tariffario imposto al servizio di trasporto collettivo, in modo da individuare il valore ottimo anche per quest'ultimo. Infine, è stata verificata l'applicabilità del modello su una rete a scala reale; in particolare, è stata ipotizzata l'implementazione di una politica *area pricing* per la città di Napoli. Le applicazioni su rete test sono descritte nei paragrafi 4.2 (descrizione della rete) e 4.3 (risultati ottenuti); le applicazioni su rete reale sono descritte nei paragrafi 4.5 (descrizione della rete) e 4.6 (risultati ottenuti).

4.2 Descrizione Rete Test

Per le applicazioni del modello di progettazione è stata utilizzata una rete test multimodale in cui gli utenti possono effettuare i loro spostamenti con l'auto, con il trasporto collettivo e/o a piedi. Per il trasporto collettivo, in analogia con quanto accade in un'area urbana di grandi dimensioni, sono ipotizzate due tipologie di servizio: un servizio di trasporto pubblico su gomma, che condivide le infrastrutture con il sistema di trasporto privato, risentendo in questo modo dei livelli di congestione presenti all'interno della rete; un servizio di trasporto pubblico su ferro, che si muove in sede propria. Il servizio di trasporto pubblico su gomma viene espletato da tre linee di autobus, quello su ferro da una linea metropolitana. Le frequenze della metropolitana sono state assunte costanti in tutte le applicazioni, mentre i parametri prestazionali del

trasporto pubblico su gomma sono stati considerati come variabili di progetto nel caso di utilizzo dei ricavi del road pricing. In analogia con quanto accade con la gestione dei trasporti in Italia, è stata ipotizzata l'esistenza di un Ente (la Pubblica Amministrazione) che ha il controllo dell'intero sistema di trasporto (cioè, fissa i parametri prestazionali del trasporto collettivo ed i livelli tariffari per tutte le modalità soggette ad un pagamento).

Al fine di individuare il ruolo giocato dalla distribuzione sul territorio delle infrastrutture e dei servizi, le coppie Origine-Destinazione sono state caratterizzate da valori molto diversi dell'accessibilità, nel senso che per alcune coppie sono disponibili tutte le modalità di trasporto, per altre, invece, l'insieme di scelta può risultare limitato ad una sola modalità. In figura 4.1 è riportato lo schema della rete test utilizzata.

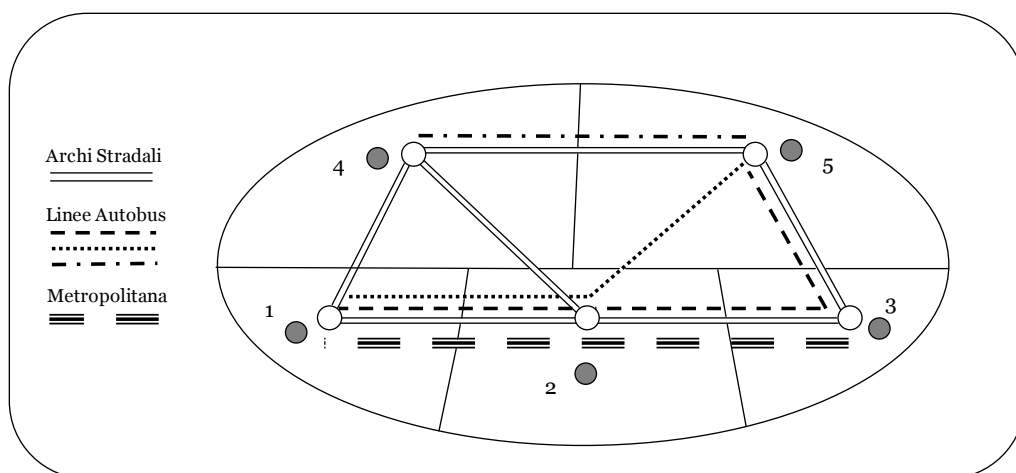


Figura 4.1: Schema della Rete Test

Nei capitoli precedenti è stata più volte sottolineata l'importanza della segmentazione dell'utenza al fine di cogliere correttamente i complessi meccanismi legati alle scelte di viaggio. Per le applicazioni sulla rete test la domanda è stata ipotizzata segmentata rispetto al possesso di un'auto e al tempo di permanenza nel sistema; quest'ultima ipotesi è resa necessaria dalla scelta di voler verificare l'efficacia di alcune politiche di parking pricing con tariffa oraria. Pertanto, si è ipotizzato che il 10% degli utenti che si muovono su ciascuna coppia O-D sia sprovvisto di mezzo proprio e,

di conseguenza, effettuerà i propri spostamenti a piedi o con il trasporto pubblico. Quindi, si è ipotizzato che il 20% della domanda totale su ciascuna coppia Origine-Destinazione sia in possesso di un'auto (l'insieme di scelta modale per tali utenti conterrà le tre le modalità auto, collettivo e pedonale) ed abbia un tempo di permanenza all'interno del sistema di due ore; infine, si è ipotizzato che il 70% della domanda totale su ciascuna coppia Origine-Destinazione sia in possesso di un'auto ed abbia un tempo di permanenza all'interno del sistema di sei ore.

Le simulazione sono state condotte ipotizzando i seguenti scenari per ciascuna strategia: un primo scenario in cui non si applica alcuna politica; un secondo in cui viene applicata la politica in esame ed i ricavi da traffico non vengono utilizzati nel sistema di trasporto, ma rappresentano soltanto un'entrata per l'amministrazione pubblica; diversi scenari in cui viene applicata la politica in esame ed i proventi vengono usati per finanziare il trasporto collettivo, secondo diverse percentuale. Il potenziamento del trasporto collettivo, reso possibile dall'uso dei ricavi, è stato espletato attraverso l'incremento delle frequenze delle linee su gomma, ritenendo tale l'intervento di miglioramento il più immediato in termini di fattibilità. Per stabilire la percentuale dei ricavi da traffico che può essere utilizzata per finanziare i sistemi di trasporto alternativi all'auto è necessario fare alcune considerazioni riguardo alla strategia di pricing che si adotta, nonché al sistema di riscossione e di controllo che si utilizzare. E' noto, infatti, che le politiche di parking pricing, per quanto complesse e differenziate possano essere le tariffe, comportano costi di implementazione bassissimi, ma costi di gestione molto elevati perché il sistema di controllo si basa prevalentemente sull'impiego di personale. Viceversa, le politiche di road pricing presentano, generalmente, costi di gestione più bassi ma possono richiedere elevati investimenti per l'implementazione del sistema. Tra le diverse politiche di pricing che impongono una tariffa di accesso ai centri cittadini, quelle che si avvalgono di sistemi elettronici per la riscossione dei pedaggi (come i *Toll Rings* norvegesi) comportano costi di gestione estremamente bassi. Mentre nei sistemi di pricing in cui il sistema di riscossione non è eccessivamente

spinto da un punto di vista tecnologico (come accade per il *Congestion Charging Scheme* di Londra), il costo di esercizio del sistema può arrivare ad assorbire fino al 50% dei ricavi da traffico. Poiché la tecnologia adottata incide sui costi di esercizio in maniere molto marcata, rendendoli fortemente variabili a seconda delle scelte effettuate, nel presente lavoro di ricerca sono state ipotizzate diverse percentuali dei proventi da poter utilizzare per il potenziamento del trasporto collettivo, pari a 25%, 50%, 75% e 100% del ricavo totale (sapendo che l'ultima circostanza è naturalmente un caso limite).

Sulla rete sono state applicate tre strategie di pricing di tipo *second-best*, quali *Area Pricing*, *Cordon Pricing* e *Parking Pricing*. In questo capitolo, con il termine *Area Pricing* è stata indicata una politica che prevede la definizione di un cordone ed il pagamento di un pedaggio uguale per tutti gli archi che lo attraversano; con il termine *Cordon Pricing*, invece, è indicata una politica che prevede la definizione di un cordone ed il pagamento di un pedaggio diverso per ciascun arco che lo interseca. Per l'applicazione sulla rete test di tali politiche è stato ipotizzato un cordone circoscritto alla zona 2, come riportato in figura 4.2.

Per il parking pricing sono state ipotizzate due tipologie tariffarie: tariffe dipendenti dalla sola destinazione dello spostamento (*Destination-Based Parking Pricing*) e tariffe dipendenti dalla coppia Origine-Destinazione su cui avviene lo spostamento (*Origin-Destination Parking Pricing*). La prima tipologia di parking pricing è la classica politica che prevede una tariffa differenziata in base alla zona in cui si effettua la sosta (tipicamente più alta nelle zone centrali e più bassa in quelle periferiche). La seconda tipologia di parking pricing permette di ottimizzare le tariffe di sosta in funzione delle caratteristiche dell'offerta di trasporto pubblico per ciascuna coppia origine-destinazione: infatti, le tariffe tenderanno ad essere più alte per le coppie origine-destinazione meglio servite dal trasporto collettivo e più basse per quelle coppie scarsamente collegate (D'Acierno et al., 2006). Le tariffe di sosta sono state ipotizzate sia fisse che orarie. Oltre alle misure di tipo *second-best* sopradescritte, è stata applicata una politica di pricing di tipo *first-best* che prevede il pagamento

di un pedaggio su ciascun arco della rete le rete, indicata in questo paragrafo semplicemente come politica di *Road Pricing*.

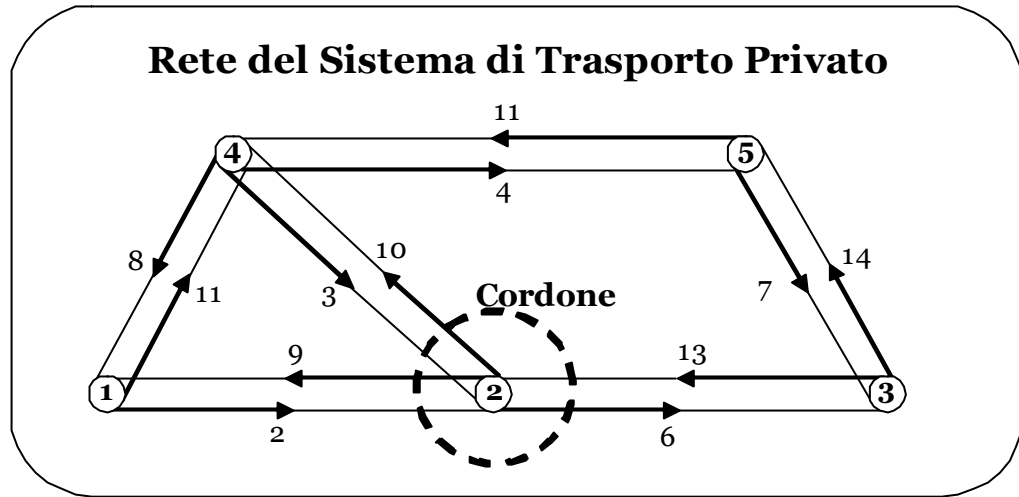


Figura 4.2: Schema della Rete di Trasporto Privato

A seconda della strategia applicata, l'algoritmo di ottimizzazione delle tariffe ha gestito un numero di variabili di progetto compreso tra 1 (politica *Area Pricing*) e 20 (politica *Origin-Destination Parking Pricing*), come riportato in tabella 4.1.

Politica di Pricing	Variabili di progetto
Area Pricing	1
Cordon Pricing	3
Road Pricing	13
Destination-Based Parking Pricing (tariffe fisse)	5
Destination-Based Parking Pricing (tariffe orarie)	5
Origin-Destination Parking Pricing (tariffe fisse)	20
Origin-Destination Parking Pricing (tariffe orarie)	20

Tabella 4.1: Variabili di progetto.

Infine, per ciascuna strategia le tariffe sono state fatte variare in un intervallo compreso tra 0€ e 2€, con un passo di 0,25€. Nel paragrafo successivo sono descritti i risultati ottenuti applicando alla rete sopradescritta il modello di calcolo delle tariffe formulato nel capitolo 3.

4.3 Risultati Ottenuti su Rete Test

Le prime applicazioni sulla rete test sono state condotte ipotizzando l'introduzione delle diverse politiche di pricing senza utilizzare i ricavi da traffico per il potenziamento del trasporto collettivo, al fine di poter effettuare un confronto tra le strategie scelte. Gli indicatori utilizzati per verificare l'efficacia di ciascuna misura sono il valore della funzione obiettivo²⁷ (F.O) del modello di progettazione formulato e le percentuali di ripartizione modale; i valori delle tariffe ottenuti in tutti gli scenari simulati sono riportati in appendice. Poiché l'uso di una misura di pricing si rende necessario quando all'interno di una rete il grado di saturazione è prossimo all'unità, è stato ipotizzato, per ciascuna coppia Origine-Destinazione, un livello di domanda tale da verificare questa condizione.

Dai valori della funzione obiettivo ottenuti (riportati in figura 4.3) è possibile dedurre che, per la rete test utilizzata, qualunque politica di pricing comporta una configurazione del sistema migliore, in termini di Social Surplus e, quindi, di benessere sociale, rispetto ad una situazione in cui non è applicata alcuna misura. Tutto ciò è perfettamente in linea con la teoria economica esposta nel primo capitolo. Tra tutte le misure *second best* esaminate, le politiche *Area* e *Cordon Pricing* risultano le meno efficaci. Ciò non stupisce perché queste strategie colpiscono gli utenti che attraversano i tre archi convergenti nel cordone e che rappresentano, pertanto, soltanto una piccola percentuale dell'utenza relativa alla modalità auto. Le due strategie presentano valori molto prossimi tra loro della funzione obiettivo, che risultano leggermente migliori nel caso del *Cordon Pricing*, in quanto quest'ultimo consente l'applicazione di tariffe più "raffinate". Tra tutte le strategie *second best* con tariffe fisse, escludendo, quindi, le due politiche di sosta oraria, la misura più efficace è l'*Origin-Destination Parking Pricing*. Tale risultato deriva dal fatto che la politica in esame permette di modulare il livello tariffario sulla base dell'accessibilità relativa di ciascun coppia origine-destinazione, tendendo

²⁷ La funzione obiettivo del modello di calcolo delle tariffe è l'opposto del Social Surplus ed è espressa in €/h.

ad attribuire tariffe maggiori alle coppie meglio servite con il trasporto collettivo e penalizzando, in questo modo, gli utenti che hanno un più ampio insieme di scelta modale.

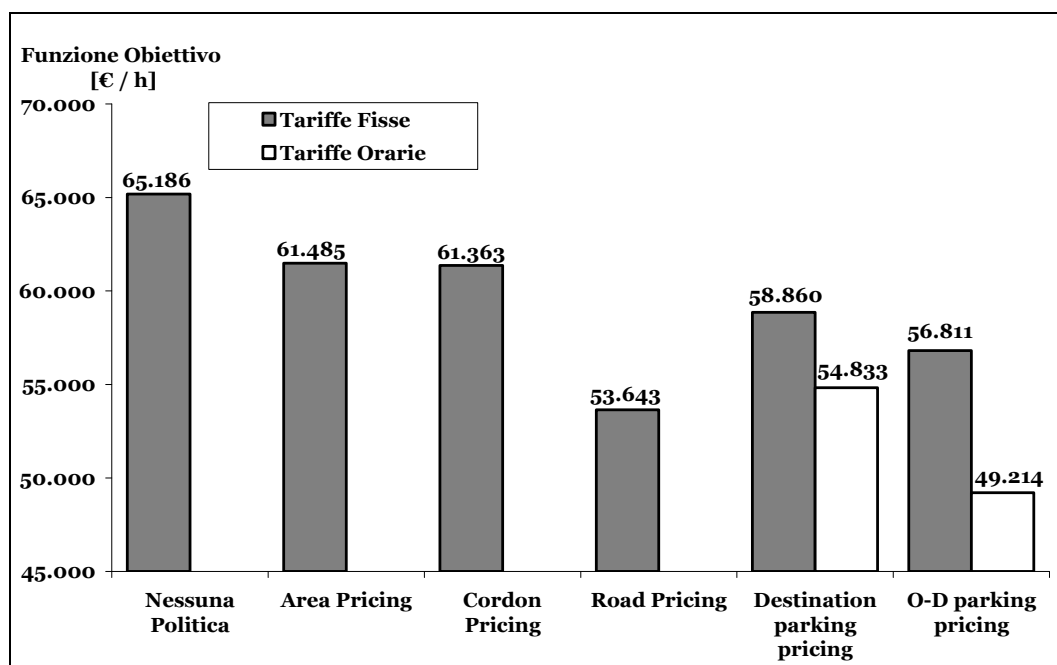


Figura 4.3: Valori della Funzione Obiettivo relativi alle Politiche di Pricing nel caso in cui i ricavi da traffico non vengano utilizzati per il potenziamento del trasporto collettivo.

Politica di Pricing	Variazione % della F.O.
Area Pricing	-5,68%
Cordon Pricing	-5,86%
Road Pricing	-17,70%
Destination-Based Parking Pricing (tariffe fisse)	-9,70%
Destination-Based Parking Pricing (tariffe orarie)	-15,88%
Origin-Destination Parking Pricing (tariffe fisse)	-12,85
Origin-Destination Parking Pricing (tariffe orarie)	-24,50%

Tabella 4.1: Variazioni percentuali della Funzione Obiettivo.

Se nel confronto tra le politiche *second-best* con tariffe fisse si aggiunge la politica *first-best*, si ottiene che la strategia che impone un pedaggio su ciascun arco della rete risulta essere la migliore, coerentemente con la teoria economica. Il risultato che sorprende è che, se si considerano, a

questo punto, anche le tariffe di sosta orarie, si ottiene che la migliore strategia in assoluto tra tutte quelle testate è l'*Origin-Destination Parking Pricing* orario. L'originalità del risultato deriva dal fatto che una strategia *second-best* (cioè sub-ottima per definizione) fornisce un incremento di benessere sociale maggiore rispetto alla politica *first-best* (cioè ottima per definizione). Infatti, la misura di parking pricing in esame determina una variazione²⁸ della funzione obiettivo pari a -24,50% (tabella 4.2) rispetto alla situazione iniziale, invece, la politica di *Road Pricing* determina una variazione pari a -17,70%. La spiegazione di ciò va cercata nella logica su cui è basata la struttura tariffaria dell'*Origin-Destination Parking Pricing* orario, nel senso che le tariffe sono modulate sia rispetto alle caratteristiche della domanda (in quanto tengono conto del tempo di permanenza degli utenti nel sistema) sia dell'offerta (in quanto considerano separatamente ciascuna coppia origine-destinazione).

Naturalmente, le diverse strategie hanno impatti differenti sulla distribuzione modale all'interno della rete (figura 4.4). Come è intuibile, le politiche di *parking pricing* (soprattutto quelle orarie) hanno una maggiore influenza sulla ripartizione modale, in quanto tendono a colpire l'utenza in maniera più uniforme rispetto alle politiche di tariffazione dei singoli archi. Infatti, mentre queste ultime interessano gli utenti che utilizzano alcuni rami della rete, agendo di conseguenza prevalentemente sulla scelta del percorso, le prime interessano in egual misura tutti gli utenti che si spostano su una stessa coppia origine-destinazione, agendo prevalentemente sulla scelta modale. In generale, le politiche di tariffazione della sosta, progettate secondo la logica della massimizzazione del benessere sociale, hanno uno spettro di azione maggiore rispetto a quelle di tariffazione degli archi. Inoltre, l'efficacia di ciascuna politica sulle singole coppie origine-destinazione è legata anche al livello di accessibilità. Ad esempio, gli utenti che nella rete test effettuano spostamenti con origine o destinazione nella zona 4 tendono ad essere meno sensibili rispetto a

²⁸ Le variazioni della funzione obiettivo sono negative perché il problema di ottimizzazione delle tariffe è finalizzato alla sua minimizzazione.

qualunque politica di pricing, in quanto i collegamenti tra questa zona e tutte le altre non sono tra i migliori. Infatti, la zona 4 non è servita dal trasporto pubblico su ferro, ma usufruisce di una linea di autobus che consente un collegamento diretto soltanto con alcune zone della rete e condivide le infrastrutture stradali con le auto. Quindi, l'accessibilità relativa tra le diverse zone di un'area urbana incide in maniera significativa sul comportamento degli utenti rispetto all'introduzione di una tariffa, rendendolo più o meno rigido a seconda della qualità del sistema di trasporto che serve ciascuna area.

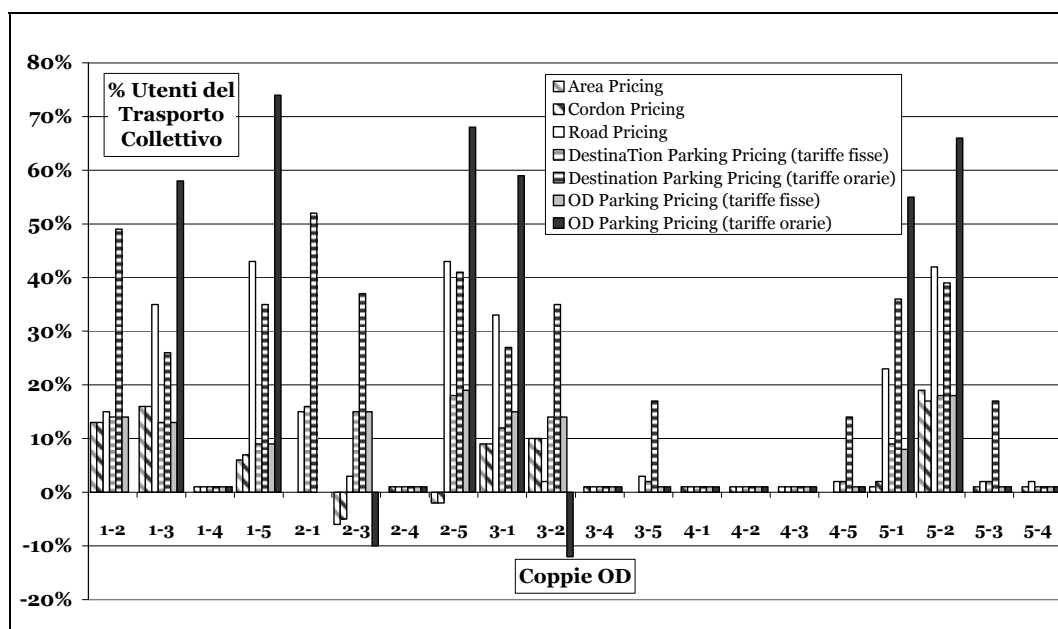


Figura 4.4: Percentuali di utenti che utilizzano il trasporto collettivo per ciascuna coppia Origine-Destinazione.

Dopo aver analizzato l'efficacia di ciascuna strategia, è stato valutato l'effetto derivante dall'utilizzo dei ricavi da traffico per il potenziamento del trasporto collettivo. Come indicatori sono stati utilizzati il valore della funzione obiettivo e la percentuale globale (e non per singola coppia origine-destinazione come fatto in precedenza) degli utenti che utilizzano il trasporto pubblico. Qualunque sia la percentuale dei proventi usata, la gerarchia delle strategie resta per lo più inalterata (figure 4.6). Infatti, le strategie *Area* e *Cordon Pricing* forniscono i risultati peggiori in termini di

benessere sociale finché la percentuale di uso dei ricavi resta al di sotto del 50%; per valori maggiori, la peggior strategia risulta essere la tariffazione della sosta di tipo *destination-based*, sia fissa che oraria; se si considerano le sole politiche con tariffe fisse, il *Road Pricing* classico risulta vincente rispetto a tutte le misure *second-best*; se si considerano anche le strategie con tariffe orarie, l'*Origin-Destination Parking Pricing* orario fornisce il miglior valore in assoluto della funzione obiettivo.

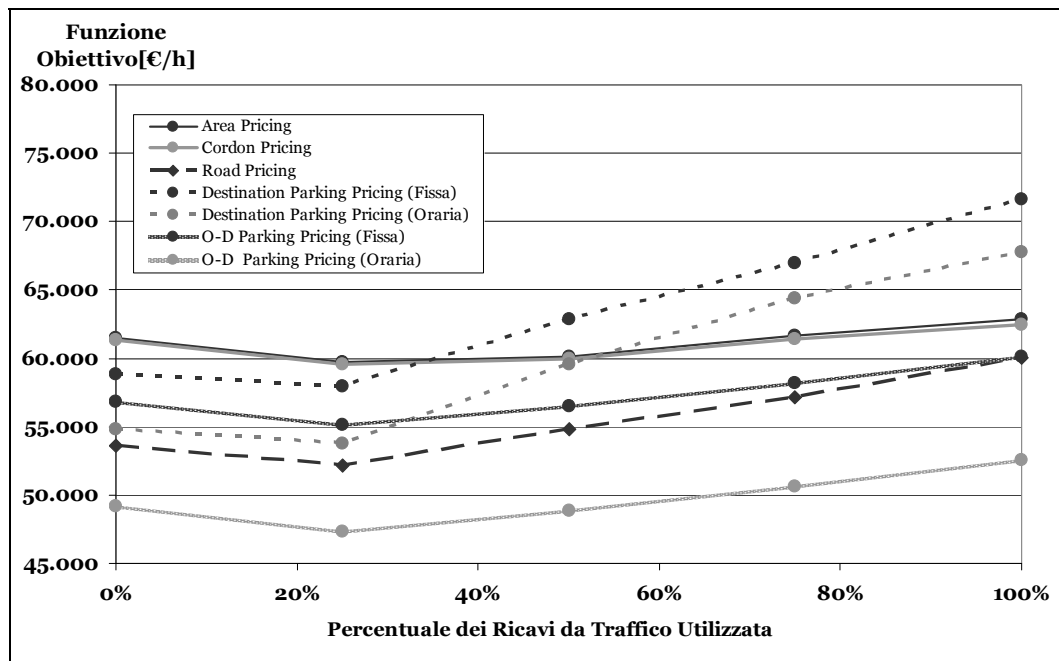


Figura 4.5: Andamento della F.O. in funzione delle diverse percentuali di utilizzo dei ricavi da traffico per il potenziamento del trasporto collettivo.

Tuttavia, il risultato più importante è che esiste un valore ottimo della percentuale d'uso dei ricavi, pari per la rete test utilizzata a 25%²⁹. La spiegazione di ciò è semplice: partendo da un assegnato valore delle frequenze del servizio di trasporto pubblico su gomma (supposte per semplicità uguali per tre linee), inizialmente la riduzione del ricavo totale (secondo termine della funzione obiettivo) è più che compensata dalla riduzione dei tempi di attesa derivanti dall'incremento delle frequenze.

²⁹ Il dettaglio dei valori assunti dalla funzione obiettivo, per ciascuna politica, nel caso in cui venga utilizzata una percentuali dei ricavi pari a 25% per il potenziamento del trasporto collettivo, è riportato in figura 4.6 a pag. 127.

Questa condizione si verifica finché non viene raggiunto un certo valore della frequenza, oltre il quale ogni variazione dei tempi di attesa diventa nulla, in quanto il sistema si stabilizza, ed ogni ulteriore spostamento dei ricavi dal trasporto privato verso il collettivo si traduce soltanto in una riduzione dei proventi e, quindi, in un peggioramento della funzione obiettivo. Il raggiungimento di una condizione come quella descritta è ascrivibile alle dimensioni ridotte della rete e del sistema di trasporto che la serve. In una rete reale, in cui le linee di trasporto pubblico su gomma sono in numero nettamente superiore rispetto alle tre della rete test, è presumibile supporre che una configurazione del genere non venga mai raggiunta. Anzi, a causa dell'elevato numero delle linee su gomma, difficilmente sarà possibile incrementare le frequenze di tutte, ma dovrà essere effettuata una scelta, stabilendo, quindi, una gerarchia delle linee da migliorare. Naturalmente, anche il livello di servizio iniziale del trasporto pubblico su gomma influenza il valore della percentuale ottima di uso dei ricavi, in quanto all'aumentare della frequenza iniziale delle 3 linee della rete viene raggiunta prima la condizione di equilibrio descritta. Un'ultima caratteristica della rete che interviene sul valore della percentuale ottima è il livello di congestione, nel caso in cui gli autobus non abbiano a disposizione corsie preferenziali ma viaggino in promiscuità con le auto. In questo caso, infatti, poiché il tempo di viaggio per un utente che usa l'autobus è pari alla somma del tempo di attesa alle fermate, del tempo a bordo e dei tempi di accesso ed egresso, un maggior livello di congestione tende a far incrementare il tempo totale, attenuando l'effetto positivo derivante dall'incremento delle frequenze. A causa di ciò, può anche accadere che livelli di congestione molto elevati rendano inefficiente qualunque uso dei ricavi, comportando, paradossalmente, un miglior valore della funzione obiettivo quando i proventi non vengono spostati. Questo spiega le particolari conclusioni a cui giunge Ferrari (2006).

Infine, bisogna osservare che l'esistenza di un valore ottimo della percentuale di uso dei proventi dipende fortemente dalla presenza del ricavo totale nell'espressione della funzione obiettivo con un peso uguale a quello dato al surplus dell'utente (utilizzato come indicatore generale dei

costi sostenuti dagli utenti nel sistema). Se si vuole rendere il problema di ottimizzazione meno vincolato al ricavo totale, modificando in questo modo anche il valore ottimo della percentuale di uso dei proventi, è sufficiente attribuire al ricavo totale un peso minore nell'espressione della funzione obiettivo rispetto agli altri termini.

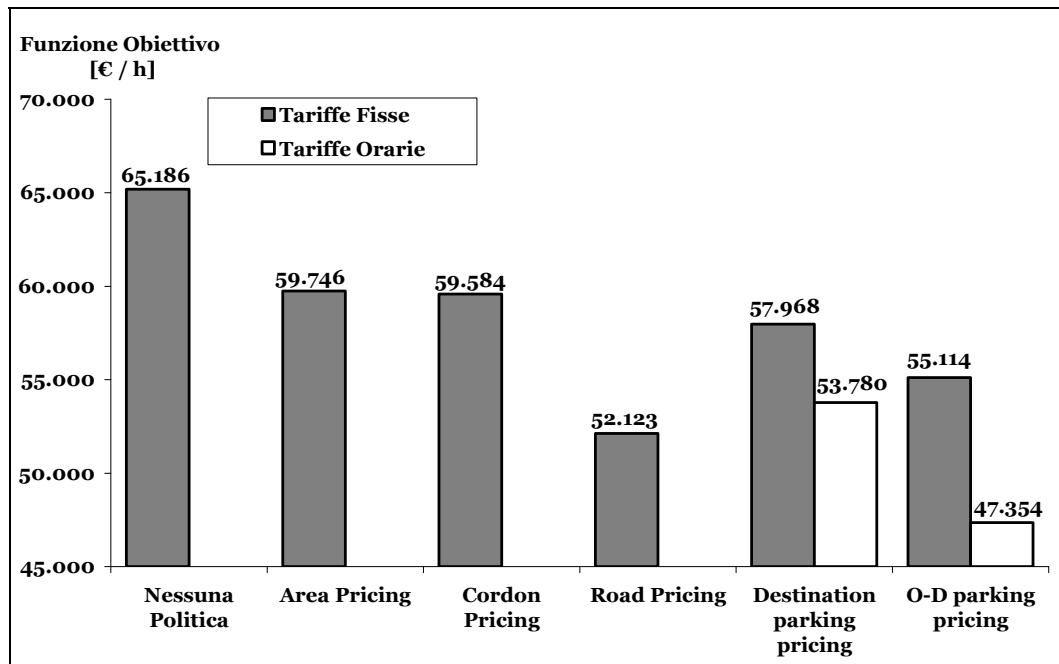


Figura 4.6: Valori della Funzione Obiettivo relativi alle Politiche di Pricing nel caso in cui il 25% dei ricavi da traffico venga utilizzato per il potenziamento del trasporto collettivo.

E' possibile effettuare un'ulteriore analisi dell'efficacia delle politiche di pricing utilizzando come indicatore non più la funzione obiettivo ma la percentuale di utenti che utilizzano il trasporto collettivo. Questa scelta è giustificata dal fatto che, sebbene le misure vengano progettate in modo da massimizzare il benessere sociale, è anche vero che esse hanno il principale scopo di riequilibrare la ripartizione modale.

In questo caso, considerando inizialmente le strategie *second-best* con tariffe fisse e la strategia *first-best*, si ottiene che la misura più efficace, cioè quella che riesce a produrre il maggior numero di utenti per il trasporto pubblico, è sempre il *Road Pricing*, coerentemente con la teoria economica e con i risultati ottenuti in precedenza. E questo è vero sempre, sia quando i ricavi da traffico non vengono utilizzati per il potenziamento

del trasporto pubblico, sia quando la percentuale dei proventi spostata dalla rete del privato a quella del collettivo è pari a quella ottima, cioè 25% (figure 4.7 e 4.8).

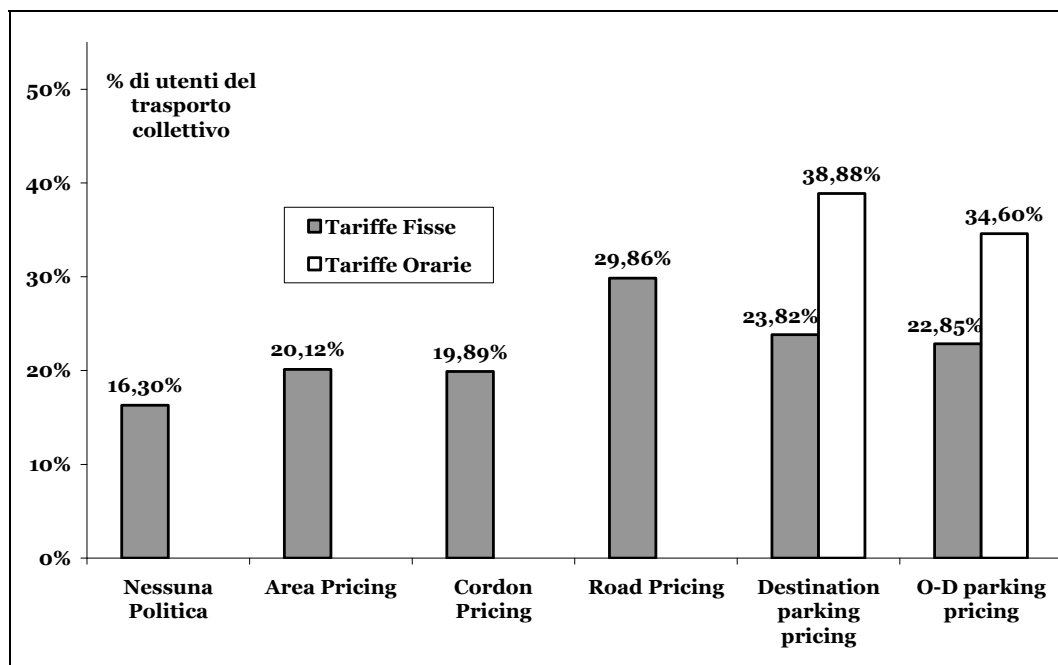


Figura 4.7: Percentuale di utenti che utilizzano il trasporto collettivo, per ciascuna strategia, nel caso in cui i ricavi da traffico non vengano utilizzati per il potenziamento del trasporto collettivo.

Se, invece, si considerano anche le strategie con tariffe orarie, si ottiene un risultato diverso rispetto a quello ottenuto in precedenza confrontando i valori della funzione obiettivo, in quanto la strategia migliore è il *Destination-Based Parking Pricing* orario. Inoltre, anche confrontando le politiche *Area* e *Cordon Pricing* si ottiene una situazione invertita rispetto alla precedente, in quanto la prima strategia in questo caso risulta migliore. In altre parole, l'uso della ripartizione modale come indicatore di efficacia comporta un'inversione nella gerarchia tra le politiche simili (*Area* e *Cordon Pricing*, *Destination-Based Parking Pricing* e *Origin-Destination Parking Pricing*), semplicemente perché tende a favorire le strategie con tariffe meno raffinate. Quindi, in generale, non è detto che una misura che risulta ottima dal punto di vista della funzione obiettivo (e quindi del benessere inteso in senso economico) lo sia anche dal punto di vista della ripartizione modale. Considerando che le politiche di pricing sono, nella

loro moderna interpretazione, prima di tutto uno strumento di gestione della domanda di mobilità, se si vuole continuare ad utilizzare il Social Surplus come funzione obiettivo e si vuole favorire, contemporaneamente, un maggior effetto della politica sulla ripartizione modale, è necessario introdurre dei pesi nell'espressione analitica della funzione stessa.

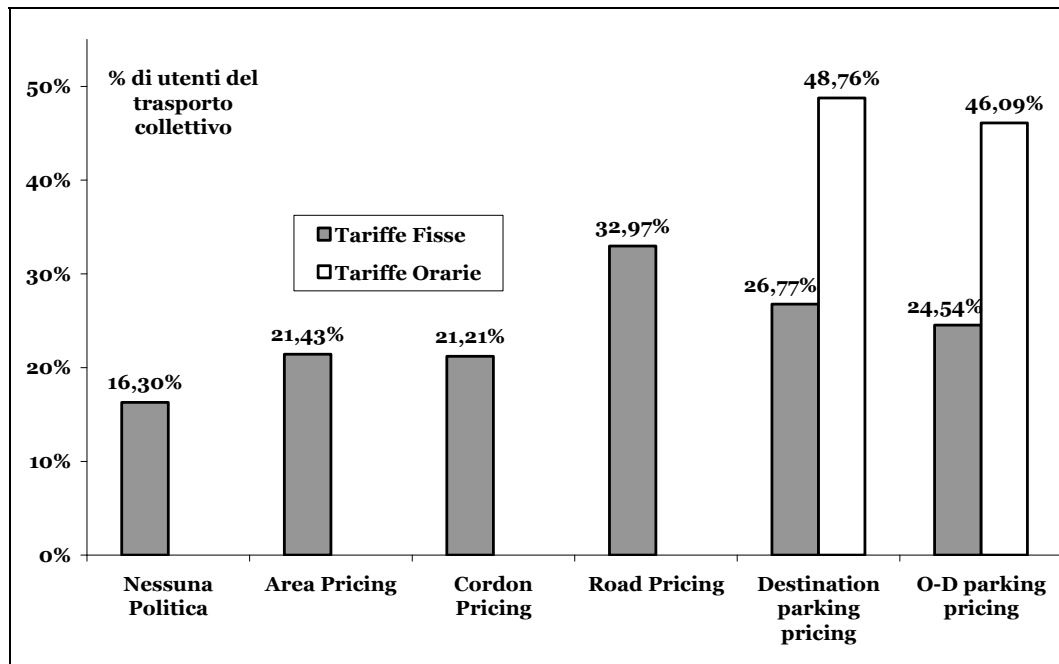


Figura 4.8: Percentuale di utenti che utilizzano il trasporto collettivo, per ciascuna strategia, nel caso in cui il 25% dei ricavi da traffico venga utilizzato per il potenziamento del trasporto collettivo.

Infine, nelle ultime applicazioni, è stato “sbloccato” il livello tariffario del trasporto collettivo, ritenuto costante e pari ad 1€ fino a questo momento. Facendo variare il suo costo da 0 a 2€, si è visto che, in termini di funzione obiettivo, il valore ottimo del biglietto è 0, cioè il massimo del benessere si ottiene quando gli utenti utilizzano i servizi (sia su ferro che su gomma) gratuitamente. In figura 4.9 sono riportati i valori della F.O. per ciascuna strategia, nel caso in cui i ricavi da traffico non vengano utilizzati per il potenziamento del trasporto collettivo, per valori del biglietto pari 0 e 1€. Bisogna sottolineare che nei sistemi reali, i ricavi da traffico del trasporto pubblico riescono solo in parte a coprire i costi di esercizio, mentre il resto è finanziato dalla Pubblica Amministrazione. Inoltre, il D.Lgs. 422/97 (Conferimento alle Regioni ed agli Enti Locali di

funzioni e compiti in materia di trasporto pubblico locale) fissa un valore soglia per il rapporto dei ricavi e dei costi. Tuttavia, nel presente lavoro di ricerca non è stato ipotizzato alcun vincolo di budget, come imposto dal sopracitato decreto, ma è stata ipotizzata una copertura illimitata da parte della Pubblica Amministrazione.

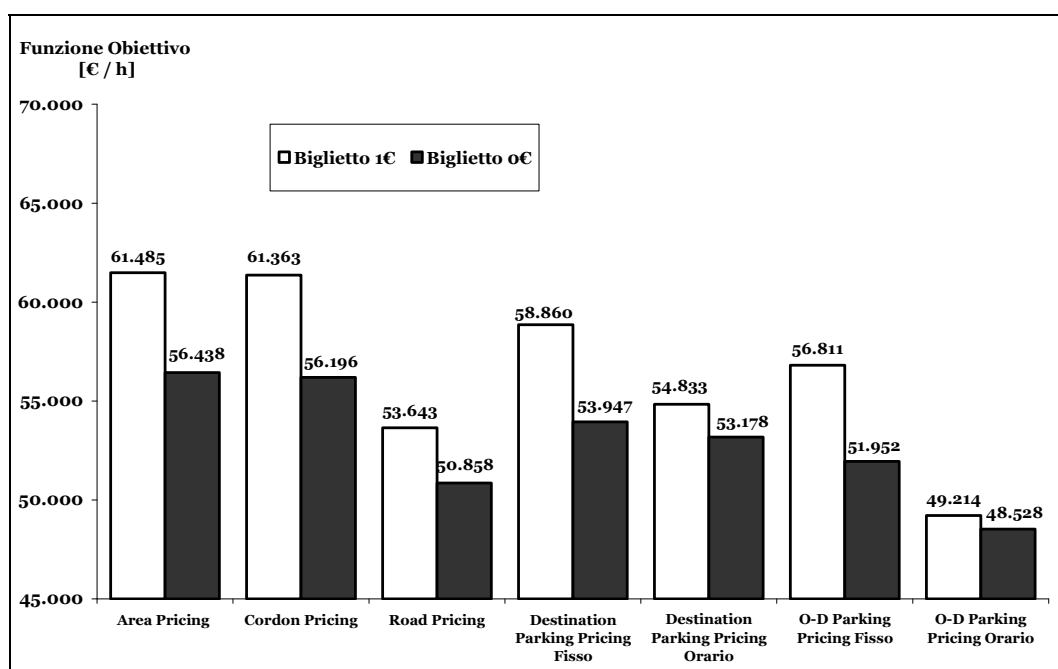


Figura 4.9: Valori della F.O. per ciascuna strategia, nel caso in cui i ricavi da traffico non vengano utilizzati per il potenziamento del trasporto collettivo, per valori del biglietto pari a 0 e 1€.

Le gerarchie tra le politiche restano inalterate se si annulla il costo del biglietto del trasporto pubblico, in quanto i valori della funzione obiettivo diminuiscono in maniera pressoché proporzionale. Un'osservazione degna di nota è che, pur non avendo inserito vincoli di budget, se si confrontano i costi di gestione del trasporto collettivo con i ricavi derivanti dalla tariffazione di tutti i sistemi, si rileva che solo nel caso delle politiche *Area* e *Cordon Pricing* si ha un esubero dei costi. Ciò suggerisce la possibilità di poter usare i ricavi derivanti dalle politiche di pricing eventualmente per la copertura dei costi del trasporto collettivo quando questi ultimi sono molto elevati.

4.4 Descrizione Rete Reale

Dopo le numerose applicazioni effettuate su rete test, è stata verificata l'applicabilità del modello alla rete di trasporto della città Napoli. In particolare, è stata analizzata l'implementazione di una politica di tipo *Area Pricing* che impone il pagamento di una somma per l'accesso ad una zona delimitata da un cordone, con una tariffa che è uguale per tutti i punti di penetrazione all'area sottoposta alla misura. La suddetta applicazioni ha richiesto una serie di attività, quali:

- costruzione del modello di offerta del trasporto privato;
- costruzione del modello di offerta del trasporto collettivo;
- zonizzazione dell'area di studio a partire dalle particelle ISTAT ed elaborazione dei dati socioeconomici necessari per il modello di domanda;
- Costruzione della matrice OD multimodale sulla base di modelli di letteratura.

E' stata ipotizzata come possibile area di intervento il quartiere Vomero; di conseguenza, l'intero territorio comunale, insieme ai comuni della periferia nord della città (Mugnano, Melito, Casamarciano, Arzano e Casavatore) sono stati accorpati in modo da definire la relativa area di studio. La scelta di studiare l'implementazione di una politica di road pricing limitatamente al Vomero è discesa dal fatto che per tale quartiere sussistono due condizioni fondamentali per l'applicabilità di una tale misura: possibilità di individuare un cordone urbanisticamente chiaro e definito che circonda l'area da sottoporre al pagamento e presenza di un trasporto collettivo con elevati livelli di servizio. Analizzando la configurazione urbanistica della città ed il sistema di trasporto che la serve, è emerso che la zona scelta è l'unica all'interno del territorio comunale che permette l'individuazione di un cordone dal contorno regolare e ben delineato; inoltre, la Linea1 della metropolitana e le funicolari, insieme alle diverse linee di trasporto pubblico su gomma che vi convergono, rendono il quartiere tra i più accessibili della città. Quest'ultima circostanza riveste particolare importanza, perché l'introduzione di una politica di pricing

produce un aumento del costo medio del trasporto privato e, se non esiste per gli utenti un sistema di trasporto alternativo all'auto con livelli di servizio elevati (come possono essere quelli forniti dalle linee su ferro), il rischio che si corre è di penalizzare la zona sottoposta alla misura con una riduzione netta dell'accessibilità. Nel caso specifico del Vomero, bisogna sottolineare che il quartiere può beneficiare non solo della metropolitana cittadina ma anche della presenza di tre delle quattro funicolari partenopee (Funicolare di Montesanto, Funicolare Centrale, Funicolare di Chiaia). Infine, è stata rilevata nell'area un'elevata diffusione della sosta regolamentata. Queste considerazioni hanno portato alla definizione di un cordone (figura 4.10) avente un'estensione tale da intersecare Via Tino da Camaino, Via Mario Fiore, Via San Gennaro ad Antignano, Viale Michelangelo, Via Aniello Falcone, Via Belvedere, Via Francesco Cilea, Via Ribera, Via Giacomo Rossini, Via Saverio Altamura e Via Arenella. Complessivamente, l'area interessata dal cordone ha una superficie di circa di 1,5 km² ed una popolazione residente di circa 45.000 abitanti (secondo i dati ISTAT del 2001).

La zonizzazione dell'area di studio è stata ottenuta partendo dalle zone censuarie utilizzate dall'ISTAT; per i dati socioeconomici si è fatto riferimento a quelli dell'ultimo censimento (2001). Questa operazione ha portato all'individuazione di 160 zone (figura 4.11 a pag. 134). La fase di estrazione delle infrastrutture rilevanti ha portato, invece, alla costruzione di un grafo stradale costituito da 1736 archi e 1176 nodi (figura 4.12 pag.134).

Per la stima della matrice Origine-Destinazione multimodale si è fatto riferimento a modelli di letteratura calibrati per la città di Napoli. La suddetta matrice è stata costruita in riferimento all'ora di punta del mattino (7:30-8:30) del giorno feriale medio. I motivi dello spostamento simulati sono tre: Casa-Lavoro, Casa-Scuola e Casa-Altri motivi. Come per le applicazioni condotte sulla rete test, sono state considerate le modalità auto, trasporto collettivo (che comprende sia i servizi su ferro che quelli su gomma) e pedonale. Naturalmente, la domanda è stata supposta segmentata rispetto ad una serie di caratteristiche dell'utenza, quali il

sempre, l'età, la disponibilità di un'auto ed il tempo di permanenza nel sistema.

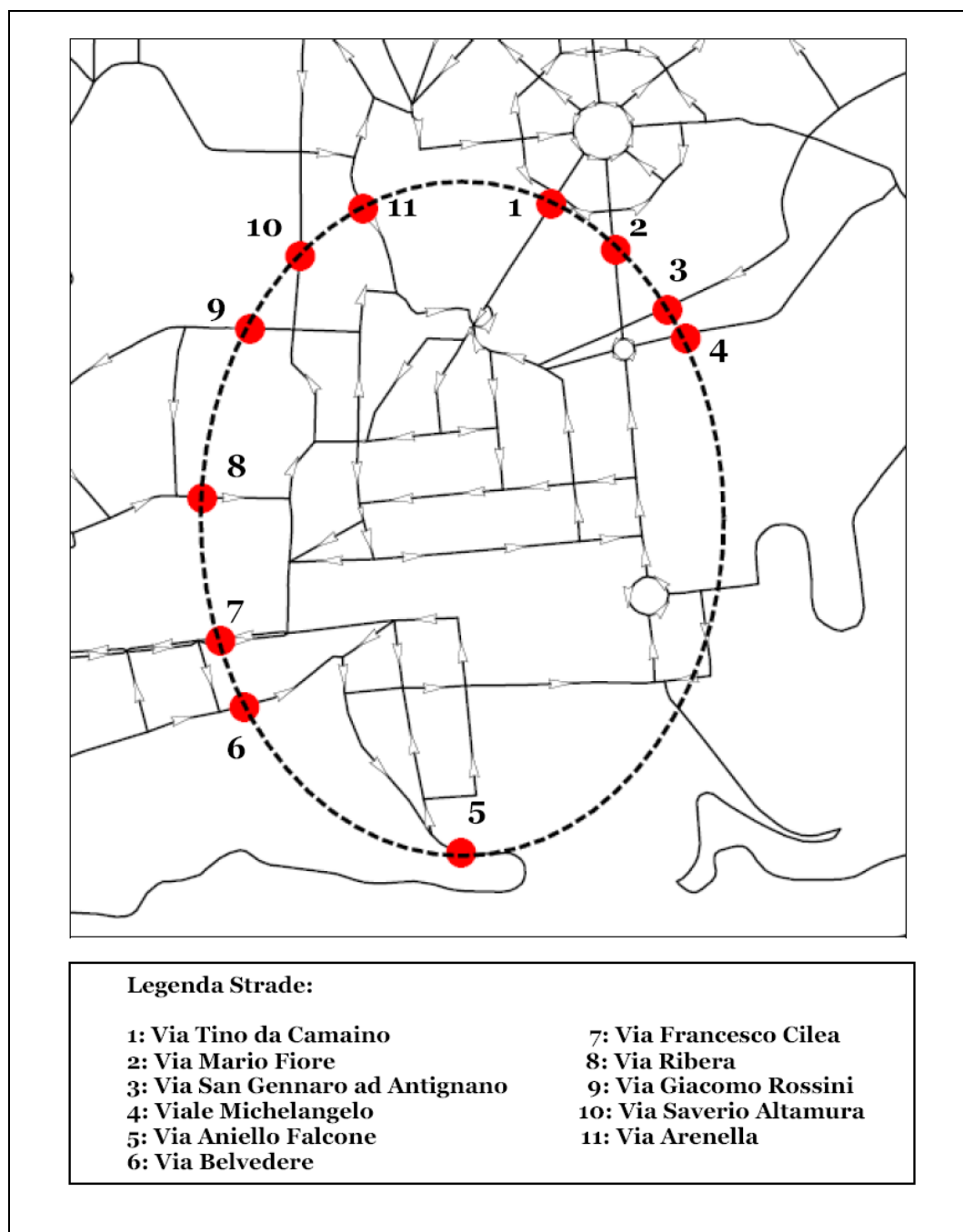


Figura 4.10: Schema del Cordone.

Data la complessità della rete, le applicazioni condotte sono state finalizzate prevalentemente alla verifica dell'applicabilità del modello. Per tale motivo, è stata ipotizzata l'introduzione di una sola strategia (*Area*

Pricing) nel caso in cui i proventi della tariffazione non vengano utilizzati per il potenziamento del trasporto pubblico. Avendo scelto una politica che impone il pagamento di un pedaggio uguale per l'attraversamento di tutti gli archi stradali che intersecano il cordone, l'algoritmo di ottimizzazione delle tariffe ha gestito, per l'individuazione della soluzione ottima, un'unica variabile di progetto. L'intervallo di variazione di quest'ultima è stato posto pari a [0€,12€], mentre il passo dell'algoritmo è stato fissato pari a 0,50€.

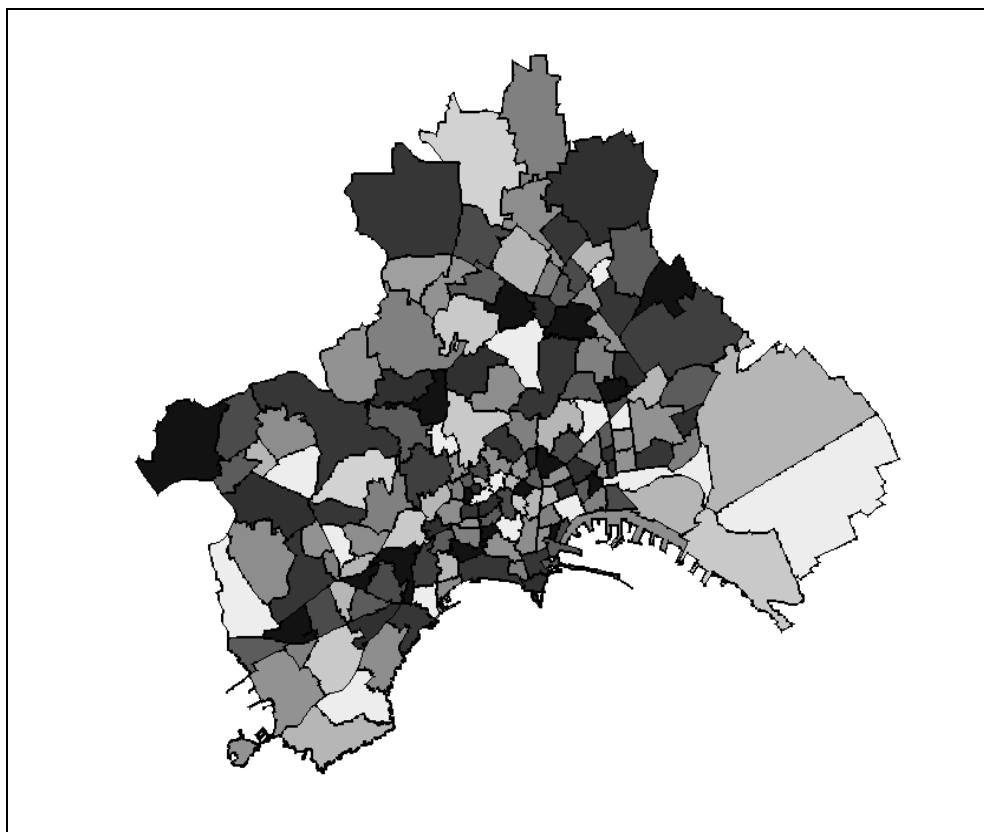


Figura 4.11: Zonizzazione dell'Area di Studio.



Figura 4.12: Grafo della Rete Stradale che serve l'Area di Studio.

4.5 Risultati su Rete Reale

Per applicare il modello di calcolo delle tariffe alla rete di trasporto della città di Napoli, sono stati simulati 4 scenari (come sintetizzato in tabella 4.2): un primo scenario in cui non viene applicata alcuna politica di pricing; un secondo in cui viene applicata la politica di *Area Pricing* in presenza di una tariffazione della sosta pari a quella attualmente vigente nella zona sottoposta alla misura; un terzo scenario in cui viene applicata la politica di *Area Pricing* come sola misura di gestione della domanda di mobilità ed è assente qualunque forma di tariffazione della sosta nell'area racchiusa dal cordone; infine, un quarto scenario in cui viene applicata la misura *Area Pricing* in presenza di una politica di parking pricing nella zona del Vomero, con tariffe di sosta orarie pari ad 1€/h. Bisogna sottolineare, che sulla tariffazione della sosta sono state fatte semplicemente delle ipotesi, non essendo questa l'oggetto della progettazione nelle applicazioni condotte sulla rete reale.

Scenario	Politica di Road Pricing	Schema di Tariffazione della Sosta nell'Area Interna al Cordone
1	Nessuna Politica	Schema Attualmente Vigente
2	Area Pricing	Schema Attualmente Vigente
3	Area Pricing	Sosta Gratuita
4	Area Pricing	Sosta Oraria con tariffa 1€/h

Tabella 4.2: Scenari Simulati

Come indicatori dell'efficacia della politica di pricing sono stati utilizzati il valore della funzione obiettivo del problema di progettazione delle tariffe e la ripartizione modale. In particolare, sono state considerate la percentuale di utenti dell'intera area di studio che utilizza il trasporto collettivo e la percentuale di utenti, con destinazione nell'area contenuta nel cordone, che utilizza il trasporto collettivo. La necessità di introdurre questo secondo indicatore deriva dal fatto che, essendo l'area racchiusa nel cordone (1,5 km² circa) molto piccola rispetto all'intera area di studio (circa 137 km²), le variazioni della percentuale di utenti che utilizzano il

trasporto collettivo sull'intera rete a seguito dell'introduzione della tariffa sono minime.

Nella configurazione iniziale, in cui non è applicata la politica *Area Pricing*, è stata rilevata una ripartizione modale caratterizzata da una percentuale di utenza che utilizza il trasporto collettivo pari al 45,52% per l'intera area di studio; invece, se ci si limita alla zona ricadente nel cordone, tale percentuale sale ad un valore pari a 84,38% della domanda con destinazione nell'area sottoposta alla misura. Questo elevato valore della percentuale è giustificato dalla presenza della Linea1 della metropolitana e delle tre funicolari. Il dettaglio dei risultati ottenuti nei quattro scenari simulati è riportato nelle figure 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 e nelle tabella 4.3 e 4.4.

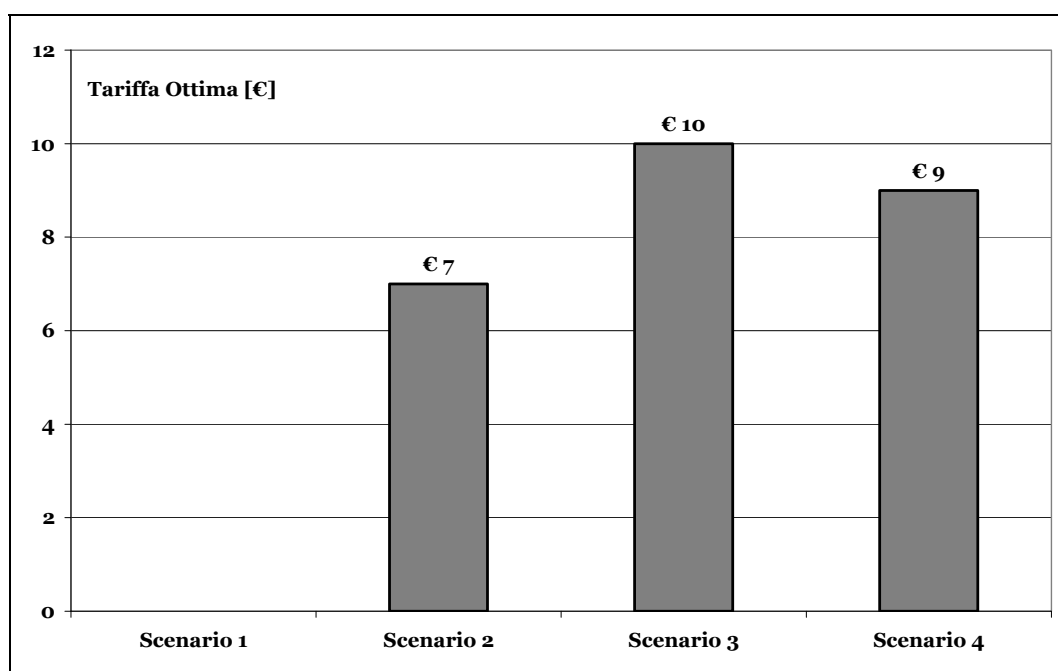


Figura 4.13: Valori Ottimi della Tariffa per gli scenari simulati.

Nello scenario in cui la politica di parking pricing riflette le tariffe di sosta attualmente applicate nella città di Napoli ed, in particolare, nel quartiere Vomero, è stato ottenuto un valore ottimo della tariffa di *Area Pricing* pari a 7€ (figura 4.13). L'applicazione di questa tariffa provoca una variazione minima della ripartizione modale sull'intera area di studio

(figura 4.15), in quanto la percentuale di utenti che utilizza il trasporto collettivo passa da un valore pari a 45,52% ad valore pari a 47,70%; invece, se si considera la sola area racchiusa nel cordone, la percentuale sale da 84,38 a 96,16%. Se si considera lo scenario in cui non vi è tariffazione della sosta nel quartiere Vomero, il valore ottimo della tariffa dell'*Area Pricing* ottenuto è 10€. A questo valore corrisponde una percentuale di utenti che utilizza il trasporto collettivo pari a 46,47% per l'intera città e a 89,20% per la zona sottoposta alla misura. Infine, ipotizzando una tariffa di sosta pari ad 1€/h, il valore ottimo del pedaggio dell'*Area Pricing* ottenuto è 9€. A tale valore corrisponde una percentuale di utenti che utilizza il collettivo pari a 47,73% per l'intera città e a 96,32% per l'area circoscritta dal cordone.

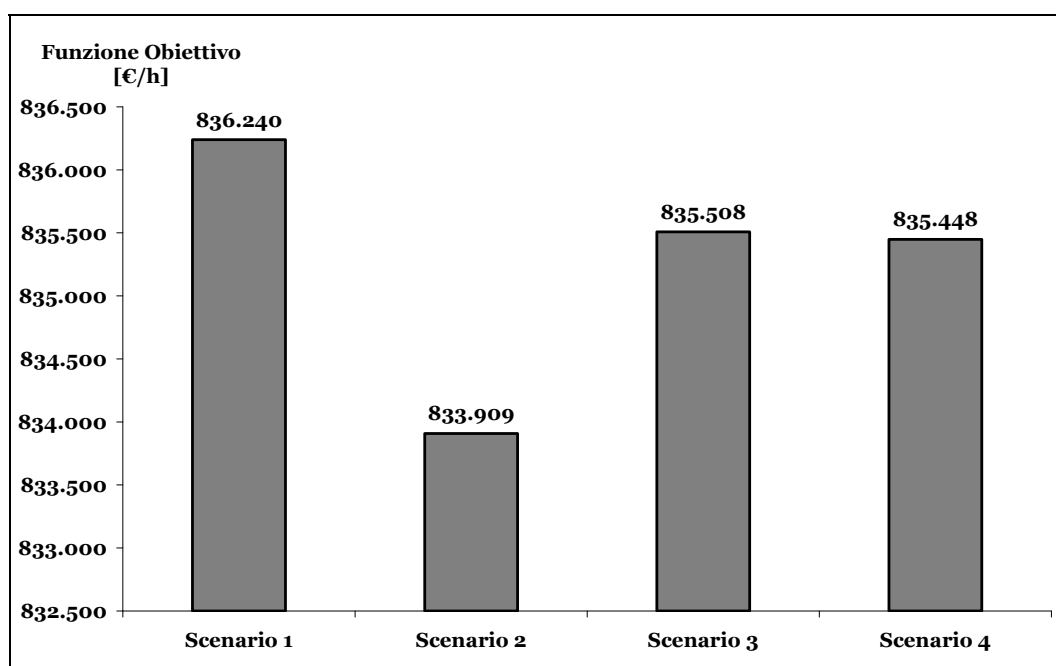


Figura 4.14: Valori della Funzione Obiettivo per gli scenari simulati.

Scenario	Variazione Percentuale della Funzione Obiettivo
Scenario 2	-0,28%
Scenario 3	-0,09%
Scenario 4	-0,09%

Tabella 4.5: Variazioni percentuali della Funzione Obiettivo rispetto allo Scenario 1.

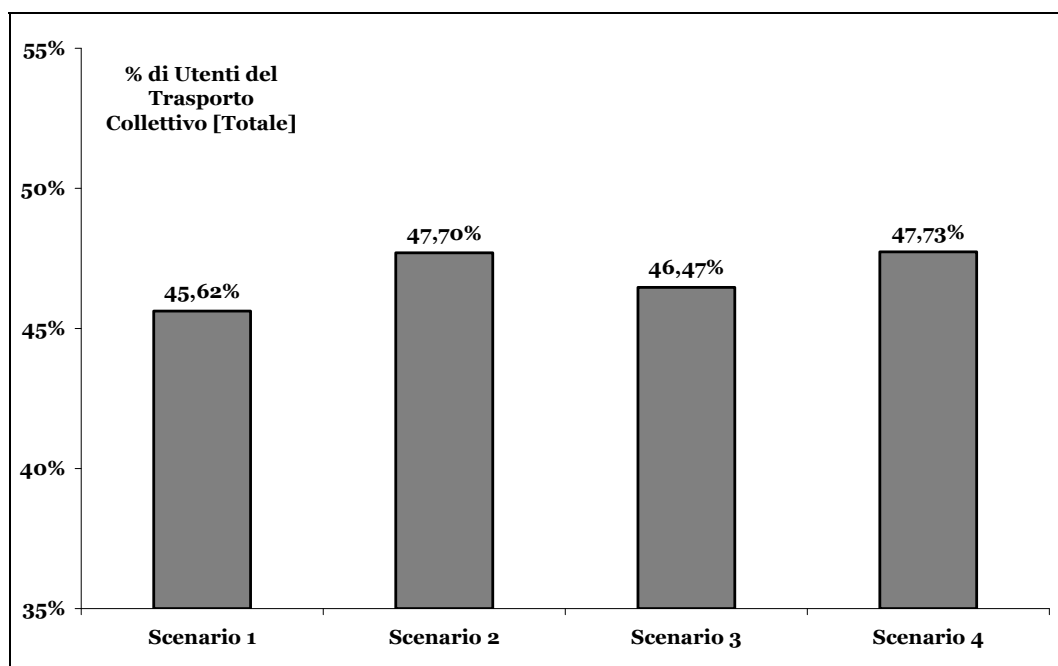


Figura 4.15: Percentuale di utenti dell'intera area di studio che utilizza il trasporto collettivo

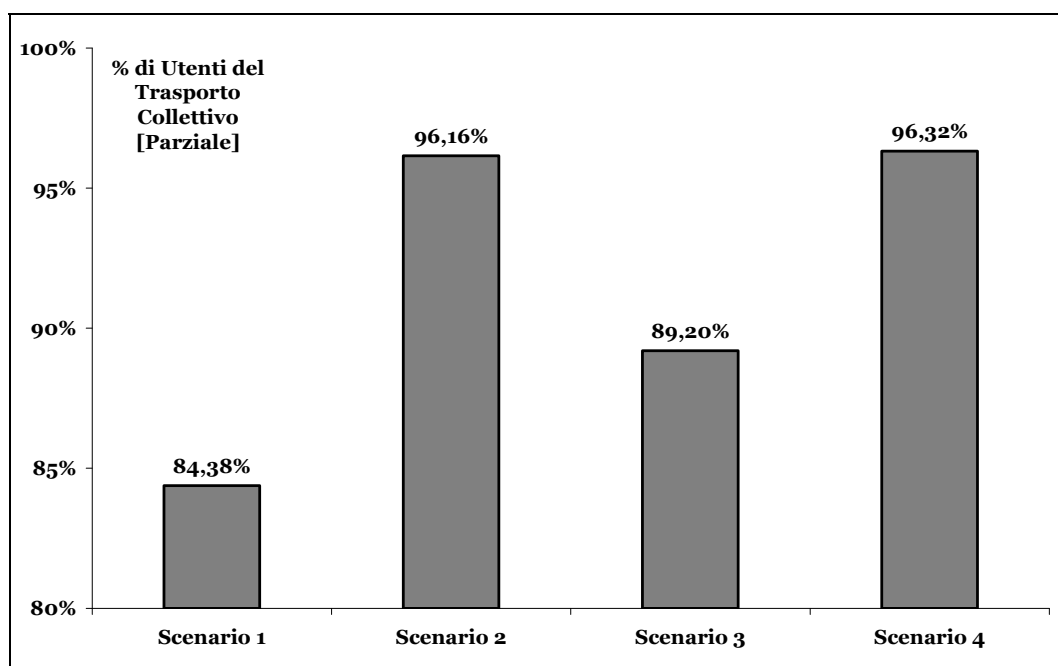


Figura 4.15: Percentuale di utenti con destinazione nell'area contenuta nel cordone che utilizza il trasporto collettivo.

Analizzando i valori della funzione obiettivo (figura 4.14), si ottiene che la miglior configurazione per la rete di trasporto della città di Napoli è quella che corrisponde allo scenario 2, in quanto determina il miglior incremento di benessere inteso in senso economico (tabella 4.5). Gli

scenari 3 e 4 comportano il raggiungimento di configurazioni di equilibrio del sistema molto prossime in termini di social surplus. Ciò significa che la sosta gratuita nella zona contenuta nel cordone abbinata ad un pedaggio leggermente più alto (10€) è equivalente, in termini di valori della funzione obiettivo, ad una sosta oraria di 1€/h abbinata ad un pedaggio più basso (9€).

Se si adotta come indicatore dell'efficacia della politica di pricing la percentuale di utenti che utilizza il trasporto collettivo (sia parziale che totale), si ottiene che lo scenario migliore non è più il secondo ma il quarto (sebbene lo scarto sia minimo). Ciò conferma la tendenza riscontrata già con le applicazioni sulla rete test, cioè la possibilità di ottenere risultati diversi a seconda che venga utilizzata come indicatore di efficienza la funzione obiettivo o la ripartizione modale. Infatti, se si considera la funzione obiettivo, lo scenario ottimo è quello in cui viene applicata una politica *Area Pricing* con tariffa pari a 7€ e la sosta è quella attuale; invece, se si utilizza la ripartizione modale, sebbene di poco, risulta preferibile lo scenario in cui la sosta è di 1€/h e la tariffa dell'area pricing è di 9€.

Scenario	Tariffa [€]	F.O [€/h]	Percentuale Utenti del Collettivo (Totale)	Percentuale Utenti del Collettivo (Parziale)
1		836.240	45,62%	84,38%
2	7	833.909	47,70%	96,16%
3	10	835.508	46,47%	89,20%
4	9	835.448	47,73%	96,32%

Tabella 4.6: Sintesi dei dati relativi ai 4 scenari simulati

CONCLUSIONI

Le numerose applicazioni condotte sulla rete test hanno permesso di individuare alcuni fattori, riconducibili sia alle caratteristiche della domanda di mobilità che a quelle dell'offerta di trasporto, che possono incidere sull'efficacia delle politiche di pricing. Inoltre, è stato possibile, con il modello di progettazione delle tariffe formulato e gli strumenti di calcolo sviluppati, verificare gli effetti prodotti dall'uso dei ricavi per il potenziamento del trasporto collettivo.

Come dettagliatamente descritto nel capitolo 4, sono state analizzate misure di pricing appartenenti a tipologie molto differenti, sia di tipo *first* che *second-best*, sia di tipo *road* che *parking pricing*. Questa scelta ha permesso di effettuare un confronto rigoroso e costruttivo tra i possibili strumenti di tariffazione degli spazi stradali di cui un decisore politico può avvalersi. Al fine di condurre una trattazione che avesse una validità generale, è stata considerata l'eventualità di tassare non solo gli archi della rete ma anche le coppie origine-destinazione (estendendo il concetto di tariffazione della sosta).

Utilizzando come indicatore dell'efficacia di ciascuna strategia il valore della funzione obiettivo del modello di progettazione proposto, è stato possibile individuare una gerarchia delle misure analizzate. Infatti, considerando le sole politiche di tipo *second-best* con tariffe fisse, le strategie di tariffazione degli archi risultano meno efficaci di quelle di tariffazione della sosta. La spiegazione di ciò deriva dall'ampiezza dello spettro di influenza di ciascuna politica. In altre parole, mentre le prime colpiscono soltanto gli utenti che utilizzano alcuni rami della rete stradale, agendo di conseguenza prevalentemente sulla scelta del percorso, le

seconde interessano in egual misura tutti gli utenti che si spostano su una stessa coppia origine-destinazione, agendo prevalentemente sulla scelta modale. Inoltre, politiche simili (tariffazione degli stessi archi o delle stesse coppie origine-destinazione secondo diversi criteri) comportano risultati simili in termini di valori della funzione obiettivo e, quindi, di benessere sociale. Se nel confronto tra le politiche *second-best* con tariffe fisse si aggiunge la politica *first-best*, si ottiene che la strategia che impone un pedaggio su ciascun arco della rete risulta essere la migliore, coerentemente con la teoria economica. Il risultato che sorprende è che, se si considerano, a questo punto, anche le tariffe di sosta orarie applicate sulla rete test, si ottiene che la migliore strategia, tra tutte quelle ipotizzate, è la politica di tariffazione della sosta con tariffe orarie e differenziate per singola coppia origine-destinazione. L'originalità del risultato deriva dal fatto che una strategia *second-best* (cioè sub-ottima per definizione) fornisce un incremento di benessere sociale maggiore rispetto alla politica *first-best* (cioè ottima per definizione). La spiegazione di ciò va cercata nella logica su cui è basata la struttura tariffaria della politica di *parking pricing* vincente, nel senso che le tariffe sono modulate sia rispetto alle caratteristiche della domanda (in quanto tengono conto del tempo di permanenza degli utenti nel sistema) sia dell'offerta (in quanto considerano separatamente ciascuna coppia origine-destinazione).

Ipotizzando di usare una parte dei proventi derivanti dalla tariffazione del trasporto privato per potenziare il trasporto collettivo, è stata riscontrata l'esistenza di un valore ottimo della percentuale dei ricavi da poter utilizzare. Questo valore dipende da una serie di parametri che possono essere sia esterni che interni al modello di calcolo delle tariffe. In particolare, i parametri esterni sono quelli riconducibili alle dimensioni della rete, al livello di servizio del trasporto collettivo nella configurazione iniziale ed al livello di congestione della rete. Per quanto riguarda il primo parametro, cioè le dimensioni della rete, bisogna osservare che partendo da un assegnato valore delle frequenze del servizio di trasporto pubblico su gomma della rete test, la riduzione del ricavo totale risulta essere più che compensata dalla riduzione dei tempi di attesa derivanti dall'incremento

delle frequenze. Questa condizione si verifica finché non viene raggiunto un certo valore della frequenza, oltre il quale ogni variazione dei tempi di attesa diventa nulla, poiché il sistema si stabilizza, ed ogni ulteriore spostamento dei ricavi dal trasporto privato verso quello collettivo si traduce soltanto in una riduzione dei proventi e, quindi, in un peggioramento della funzione obiettivo. Il raggiungimento di una condizione come quella descritta è ascrivibile alle dimensioni ridotte della rete e del sistema di trasporto che la serve. In una rete reale, in cui le linee di trasporto pubblico su gomma sono in numero nettamente superiore rispetto a quelle ipotizzate per la rete test, è presumibile supporre che una configurazione del genere non venga mai raggiunta. Anzi, a causa dell'elevato numero delle linee su gomma, difficilmente sarà possibile incrementare le frequenze di tutte, ma dovrà essere effettuata una scelta, stabilendo, quindi, una gerarchia delle linee da migliorare. Naturalmente, anche il livello di servizio iniziale del trasporto pubblico su gomma influenza il valore della percentuale ottima di uso dei ricavi, in quanto all'aumentare della frequenza iniziale delle linee della rete viene raggiunta prima la condizione di equilibrio descritta. Il terzo parametro esterno al modello di progettazione, che interviene sul valore della percentuale ottima dei ricavi da poter usare, è il livello di congestione, nel caso in cui gli autobus non abbiano a disposizione corsie preferenziali ma viaggino in promiscuità con le auto. In questo caso, infatti, poiché il tempo di viaggio per un utente che usa l'autobus è pari alla somma del tempo di attesa alle fermate, del tempo a bordo e dei tempi di accesso ed egresso, un maggior livello di congestione tende a far incrementare il tempo totale, attenuando l'effetto positivo derivante dall'incremento delle frequenze. A causa di ciò, può anche accadere che livelli di congestione molto elevati rendano inefficiente qualunque uso dei ricavi, comportando, paradossalmente, un miglior valore della funzione obiettivo quando i proventi non vengono spostati.

Bisogna osservare che l'esistenza di un valore ottimo della percentuale di uso dei proventi dipende fortemente dalla presenza del ricavo totale nell'espressione della funzione obiettivo con un peso uguale a quello dato

al surplus dell'utente. Questo è, naturalmente, il parametro imputabile al modello di calcolo formulato. Se si vuole rendere il problema di ottimizzazione meno vincolato al ricavo totale, modificando in questo modo anche il valore ottimo della percentuale di uso dei proventi, è sufficiente attribuire al ricavo totale un peso minore nell'espressione della funzione obiettivo rispetto agli altri termini.

E' possibile effettuare un'ulteriore analisi dell'efficacia delle politiche di pricing utilizzando come indicatore non più la funzione obiettivo ma la percentuale di utenti che utilizzano il trasporto collettivo. Questa scelta è giustificata dal fatto che, sebbene le misure vengano progettate in modo da massimizzare il benessere sociale, è anche vero che esse hanno il principale scopo di riequilibrare la ripartizione modale. Il risultato di rilievo riscontrato è che l'uso della ripartizione modale come indicatore di efficacia comporta un'inversione nella gerarchia tra le politiche simili, in quanto tende a favorire le strategie con tariffe meno raffinate. Confrontando tutte strategie, si ottiene che la strategia migliore risulta essere la tariffazione della sosta con tariffe orarie differenziate sulla sola destinazione dello spostamento. Anche in questo caso una politica di *parking pricing* (cioè *second-best*) risulta preferibile ad una politica *first-best*, sebbene la politica di tariffazione della sosta in questione sia diversa da quella risultata vincente nel caso precedente (cioè utilizzando la funzione obiettivo come indicatore). Poiché i due indicatori hanno fornito risultati diversi, in generale, non è detto che una misura che risulta ottima dal punto di vista della funzione obiettivo (e cioè del benessere inteso in senso economico) lo sia anche dal punto di vista della ripartizione modale. Questa circostanza è stata riscontrata anche applicando il modello di calcolo formulato alla rete di trasporto reale scelta. Considerando che le politiche di pricing sono, nella loro moderna interpretazione, prima di tutto uno strumento di gestione della domanda di mobilità, se si vuole continuare ad utilizzare il Social Surplus come funzione obiettivo e si vuole favorire, contemporaneamente, un maggior effetto della politica sulla ripartizione modale, è necessario introdurre dei pesi nell'espressione analitica della funzione stessa.

La conclusione più importante che può essere tratta da tutte le precedenti osservazioni è che una politica di tariffazione della sosta ben progettata, sebbene di tipo *second-best*, può fornire in molti casi risultati migliori sia in termini di funzione obiettivo che di ripartizione modale rispetto ad una classica politica *first-best*, come il *road pricing* esteso a tutto la rete, risultando più un costrutto teorico che non un reale strumento di gestione della domanda di mobilità in ambito urbano.

RINGRAZIAMENTI

Un particolare ringraziamento va fatto al mio gruppo di ricerca, che mi ha fornito gli strumenti senza i quali questo lavoro di ricerca non avrebbe mai visto la luce. Ringrazio il professore Bruno Montella, che ha creduto in me e mi ha accolta come sua dottoranda affidandomi spesso responsabilità di cui sono molto orgogliosa. Ringrazio Mariano Gallo, che, pur non essendo sempre presente in dipartimento perché impegnato nella sua attività di docenza presso l'Università del Sannio, con il suo buon umore è riuscito molte volte a trasmettermi lo spirito necessario per andare avanti. Infine, ma non per questo ultimo, ringrazio Luca D'Acerno, con il quale ho condiviso molte ore di lavoro, spesso tra alti e bassi, e che ha avuto il merito di farmi andare al di là dei miei limiti, spronandomi a realizzare imprese che altrimenti avrei ritenuto impossibili.

APPENDICE

In questa Appendice sono riportati i valori delle tariffe, di arco e per coppie origine-destinazione, relativamente a tutti gli scenari simulati sulla rete test e per ciascuna strategia. In particolare, i dati sono riferiti ai seguenti scenario:

Scenario 1: Applicazione di una politica di pricing, senza alcun utilizzo dei proventi derivanti dalla tariffazione per il potenziamento del trasporto collettivo.

Scenario 2: Applicazione di una politica di pricing ed utilizzo del 25% dei proventi derivanti dalla tariffazione per il potenziamento del trasporto collettivo.

Scenario 3: Applicazione di una politica di pricing ed utilizzo del 50% dei proventi derivanti dalla tariffazione per il potenziamento del trasporto collettivo.

Scenario 4: Applicazione di una politica di pricing ed utilizzo del 75% dei proventi derivanti dalla tariffazione per il potenziamento del trasporto collettivo.

Scenario 5: Applicazione di una politica di pricing ed utilizzo del 100% dei proventi derivanti dalla tariffazione per il potenziamento del trasporto collettivo.

Scenario 6: Applicazione di una politica di pricing senza alcun utilizzo dei proventi derivanti dalla tariffazione per il potenziamento del trasporto collettivo, nel caso in cui il costo del biglietto del trasporto collettivo sia nullo.

La nomenclatura utilizzata per gli archi e le coppie origine-destinazione è basata sullo schema della rete del sistema di trasporto privato riportato in figura A.1.

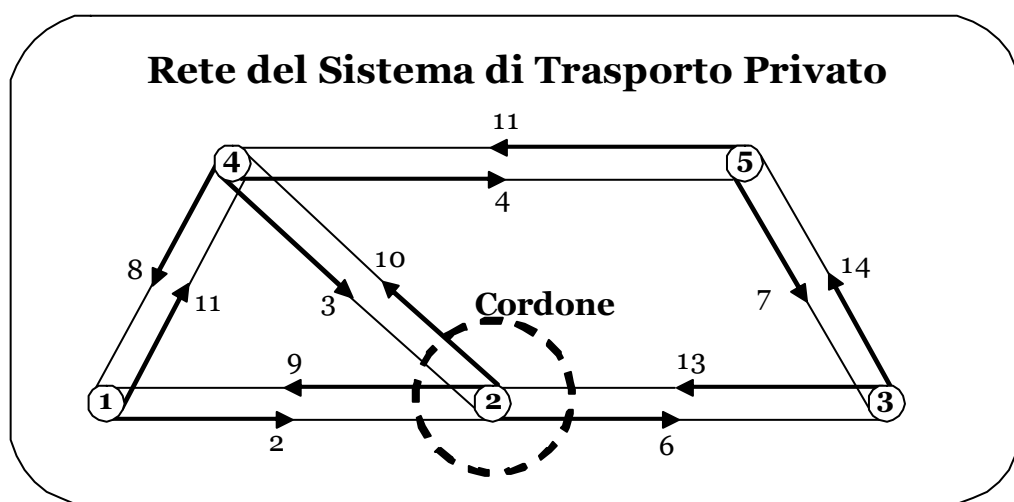


Figura A.1: Schema della Rete del Sistema di Trasporto Privato

Le diverse strategie sono state applicate sulla rete separatamente, al fine di verificare l'efficacia di ciascuna di esse presa singolarmente. Con l'applicazione delle politiche *area pricing* e *cordon pricing* gli archi interessati dalla tariffazione sono solo tre (2-3-13), avendo immaginato un cordone circoscritto alla zona 2, come riportato in figura A.1. Come spiegato nel capitolo 4, nel caso della politica *area pricing* le tariffe saranno uguali per tre archi; nel caso della politica *cordon pricing* saranno, invece, diverse. Con l'applicazione della politica *road pricing* la tariffazione è stata imposta su tutti gli archi della rete (1-2-3-4-6-7-8-9-10-11-13). Con l'applicazione della politica *destination-based parking pricing* le tariffe di sosta sono differenziate in base alla destinazione, individuando così 5 gruppi di coppie origine-destinazione (Gruppo A: 1-2, 3-2, 4-2, 5-2;

Gruppo B: 1-3, 2-3, 4-3, 5-3; Gruppo C: 1-4, 2-4, 3-4, 5-4; Gruppo C: 1-5, 2-5, 3-5, 4-5; Gruppo D: 2-1; 3-1; 4-1; 5-1). Infine, con l'applicazione della politica *origin-estination parking pricing*, sono imposte tariffe di sosta diverse per ciascuna delle venti coppie origine-destinazione.

Scenario 1

Strategia: Area Pricing																					
F.O. [€/h]	61.485			% dei ricavi utilizzata			0														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	2,00	2,00	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Cordon Pricing																					
F.O. [€/h]	61.363			% dei ricavi utilizzata			0														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	2,00	1,25	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Road Pricing																					
F.O. [€/h]	53.643			% dei ricavi utilizzata			0														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	2,00	2,00	1,25	2,00	2,00	2,00	0,75	2,00	1,50	2,00	2,00	2,00									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Fisse)																					
F.O. [€/h]	58.860			% dei ricavi utilizzata			0														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Orarie)																					
F.O. [€/h]	54.833			% dei ricavi utilizzata			0														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0,75	0,75	0,00	0,75	0,75	0,75	0,00	0,75	0,75	0,75	0,00	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,00	

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Fisse)																					
F.O. [€/h]	56.811			% dei ricavi utilizzata			0														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Orarie)																					
F.O. [€/h]	49.214			% dei ricavi utilizzata			0														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	0,00	0,00	

Tab. A.1: Valori delle Tariffe ottenute nello Scenario 1.

Scenario 2

Strategia: Area Pricing

F.O. [€/h]	59.746				% dei ricavi utilizzata				25%															
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14												
Tariffa [€]	0	2,00	2,00	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0												
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4				
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Cordon Pricing

F.O. [€/h]	59.584				% dei ricavi utilizzata				25%															
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14												
Tariffa [€]	0	2,00	1,25	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0												
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4				
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Road Pricing

F.O. [€/h]	52.123				% dei ricavi utilizzata				25%															
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14												
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,25	2,00	2,00	2,00	0,25	2,00	0,25	2,00	2,00	2,00												
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4				
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Fisse)

F.O. [€/h]	57.968				% dei ricavi utilizzata				25%																
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14													
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0													
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4					
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00				

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Orarie)

F.O. [€/h]	53.780				% dei ricavi utilizzata				25%															
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14												
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4				
Tariffa [€]	0,75	0,75	0,00	1,00	0,75	0,75	0,00	1,00	0,75	0,75	0,00	1,00	0,75	0,75	0,75	1,00	0,75	0,75	0,75	0,00				

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Fisse)

F.O. [€/h]	55.114				% dei ricavi utilizzata				25%															
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14												
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4				
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00				

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Orarie)

F.O. [€/h]	47.354				% dei ricavi utilizzata				25%															
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14												
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4				
Tariffa [€]	0,50	2,00	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00				

Tab. A.2: Valori delle Tariffe ottenute nello Scenario 2.

Scenario 3

Strategia: Area Pricing																					
F.O. [€/h]	60.140			% dei ricavi utilizzata			50%														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	2,00	2,00	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Cordon Pricing																					
F.O. [€/h]	59.964			% dei ricavi utilizzata			50%														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	2,00	1,25	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Road Pricing																					
F.O. [€/h]	54.809			% dei ricavi utilizzata			50%														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,25	2,00	2,00	2,00	0,25	2,00	0,25	2,00	2,00	2,00									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Fisse)																					
F.O. [€/h]	62.878			% dei ricavi utilizzata			50%														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Orarie)																					
F.O. [€/h]	59.529			% dei ricavi utilizzata			50%														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0,75	0,75	0,00	0,75	0,75	0,75	0,00	0,75	0,75	0,75	0,00	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,00	0,00

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Fisse)																					
F.O. [€/h]	56.500			% dei ricavi utilizzata			50%														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Orarie)																					
F.O. [€/h]	48.896			% dei ricavi utilizzata			50%														
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0,75	2,00	1,00	0,75	0,50	2,00	0,75	2,00	2,00	2,00	0,75	0,50	0,75	0,00	0,75	1,50	1,00	2,00	0,50	0,50	0,50

Tab. A.3: Valori delle Tariffe ottenute nello Scenario 3.

Scenario 4

Strategia: Area Pricing

F.O. [€/h]	61.640			% dei ricavi utilizzata			75%													
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]	0	2,00	2,00	0	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0							
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Cordon Pricing

F.O. [€/h]	61.397			% dei ricavi utilizzata			75%													
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]	0	2,00	1,25	0	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0							
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Road Pricing

F.O. [€/h]	57.136			% dei ricavi utilizzata			75%													
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,25	2,00	2,00	2,00	0,25	2,00	0,25	2,00	2,00	2,00								
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Fisse)

F.O. [€/h]	66.944			% dei ricavi utilizzata			75%													
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Orarie)

F.O. [€/h]	64.411			% dei ricavi utilizzata			75%													
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]	0,75	0,50	0,00	0,75	0,50	0,50	0,00	0,75	0,50	0,75	0,00	0,75	0,50	0,75	0,50	0,75	0,50	0,75	0,50	0,00

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Fisse)

F.O. [€/h]	58.229			% dei ricavi utilizzata			75%													
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Orarie)

F.O. [€/h]	50.658			% dei ricavi utilizzata			75%													
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]	0,75	2,00	1,00	1,25	0,50	2,00	0,75	0,75	2,00	0,75	1,00	0,75	1,00	0,75	1,75	1,25	0,75	2,00	0,75	0,75

Tab. A.4: Valori delle Tariffe ottenute nello Scenario 4.

Scenario 5

Strategia: Area Pricing																				
F.O. [€/h]	62.845			% dei ricavi utilizzata			100%													
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]	0	2,00	2,00	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0								
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Cordon Pricing																					
F.O. [€/h]		62.474		% dei ricavi utilizzata				100%													
Arco		1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]		0	2,00	1,00	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0								
Coppia O-D		1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Road Pricing																				
F.O. [€/h]	60.068			% dei ricavi utilizzata			100%													
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,25	2,00	2,00	2,00	0,25	2,00	0,25	2,00	2,00	2,00								
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Fisse)																					
F.O. [€/h]		71.643		% dei ricavi utilizzata				100%													
Arco		1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
Coppia O-D		1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]		2,00	1,50	1,00	2,00	1,75	1,50	1,00	2,00	1,75	2,00	1,75	2,00	1,75	2,00	1,50	2,00	1,75	2,00	1,50	1,00

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Orarie)																					
F.O. [€/h]		67.810		% dei ricavi utilizzata				100%													
Arco		1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
Coppia O-D		1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]		0,50	0,50	0,00	1,25	0,50	0,50	0,00	1,25	0,50	0,50	0,00	1,25	0,50	0,50	0,50	1,25	0,50	0,50	0,50	0,00

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Fisse)																					
F.O. [€/h]		60.144		% dei ricavi utilizzata				100%													
Arco		1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
Coppia O-D		1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]		2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Orarie)																					
F.O. [€/h]		52.588			% dei ricavi utilizzata			100%													
Arco		1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14								
Tariffa [€]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
Coppia O-D		1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4
Tariffa [€]		0.75	0.75	1.00	1.00	0.75	2.00	0.75	0.75	0.75	1.00	1.00	0.75	0.75	0.50	1.75	1.25	1.00	1.00	0.75	0.75

Tab. A.5: Valori delle Tariffe ottenute nello Scenario 5.

Scenario 6

Strategia: Area Pricing																					
F.O. [€/h]	56.438			% dei ricavi utilizzata			0%			biglietto del trasporto collettivo			0 €								
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	2,00	2,00	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Cordon Pricing																					
F.O. [€/h]	56.196			% dei ricavi utilizzata			0%			biglietto del trasporto collettivo			0 €								
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	2,00	1,25	0	0	0	0	0	0	0	2,00	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Road Pricing																					
F.O. [€/h]	50.858			% dei ricavi utilizzata			0%			biglietto del trasporto collettivo			0 €								
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	1,50	1,75	0,75	2,00	2,00	1,50	0,00	1,50	0,25	2,00	2,00	0,75									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Fisse)																					
F.O. [€/h]	53.947			% dei ricavi utilizzata			0%			biglietto del trasporto collettivo			0 €								
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	

Strategia: Destination Based Parking Pricing (Tariffe Orarie)																					
F.O. [€/h]	53.178			% dei ricavi utilizzata			0%			biglietto del trasporto collettivo			0 €								
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00	

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Fisse)																					
F.O. [€/h]	51.952			% dei ricavi utilizzata			0%			biglietto del trasporto collettivo			0 €								
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	2,00	2,00	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	

Strategia: Origin-Destination Parking Pricing (Tariffe Orarie)																					
F.O. [€/h]	48.528			% dei ricavi utilizzata			0%			biglietto del trasporto collettivo			0 €								
Arco	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	13	14									
Tariffa [€]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
Coppia O-D	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-5	5-1	5-2	5-3	5-4	
Tariffa [€]	0,00	2,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	2,00	0,00	0,00	

Tab. A.5: Valori delle Tariffe ottenute nello Scenario 6.

BIBLIOGRAFIA

- Adler J.L., Cetin M., 2001. "A direct redistribution model of congestion pricing". *Transportation Research B* 35, pp. 447-460.
- Agenzia Milanese Ambiente e Mobilità (2002). Studio per l'introduzione del road pricing a Milano.
- Agenzia Milanese Ambiente e Mobilità (2008). Rapporto Ecopass-Gennaio 2008.
- Agenzia Milanese Ambiente e Mobilità (2009). Monitoraggio Ecopass: Gennaio-Dicembre 2008.
- Armeliu s H., Hultkrantz L., 2006. "The politico-economic link between public transport and road pricing: an ex-ante study of Stockholm road pricing trial". *Transport Policy* 13, pp. 162-172.
- Arnott R., Kraus M., 1998. "When are anonymous congestion charges consistent with marginal cost pricing?". *Journal of Public Economics* 67, pp. 45-64.
- Bates J., Shepherd N., Roberts M., van der Hoorn A., Pol H., 1990. "A model of departure time choice in the presence of road pricing surcharges". In: Proceeding of Seminar H: Transportation Planning Methods, PTRC, 18th Summer Annual Meeting, London, pp. 227-246.
- Beckmann M.J., McGuire C.B., Winsten C.B., 1956. "*Studies in the Economics of Transportation*". Yale University Press, New Haven, CT.
- Bell M.G.H., 1995. "Stochastic user equilibrium assignment in networks with queues". *Transportation Research B* 29, pp. 125-137.
- Bellei G., Gentile G., Papola N., 2000. "Ottimizzazione del trasporto urbano in contesto multiutente e multimodo mediante l'introduzione dei Pedaggi". In: Cantarella, G., Russo, F., (Eds), *Metodi e Tecnologie dell'Ingegneria dei Trasporti*. Franco Angeli s.r.l, Milano, Italia.
- Bellei G., Gentile G., Papola N., 2002. "Network pricing optimization in multi-user and multimodal context with elastic demand". *Transportation Research B* 36, pp.779-798.
- Bergendorff P., Hearn D.W., Ramana M. V., 1997. "Congestion toll pricing

- of traffic networks". In: Pardalos, P.M. (ed), *Network Optimisation Springer series Lecture Notes In Economics and Mathematics*, pp. 51-71.
- Bonsall P., Shires J., Maule J., Matthews B., Beale J., 2007. "Responses to complex pricing signals: Theory, evidence and implications for road pricing". *Transportation Research A* 41, pp. 672-683.
- Boyce D. E., Mahmassani H. S., Nagurney A., 2005. "A retrospective on Beckmann, McGuire, and Winsten's Studies in the Economics of Transportation". *Regional Science* 84, pp. 85-103.
- Cantarella G.E., 1997. "A general fixed-point approach to multimode multiuser equilibrium assignment with elastic demand". *Transportation Science* 31, pp. 107-128.
- Cantarella G.E., Cascetta E., 2001. "Chapter 5: Models for traffic assignment to transportation network". In Cascetta, 2001, *Transportation systems engineering: theory and methods*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Nederland.
- Cascetta E., 2001, *Transportation systems engineering: theory and methods*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Nederland.
- Coase R. H., 1960. "The Problem of Social Cost". *Journal of Law and Economy* Vol. 3, No.1, pp: 1-44.
- Commissione Europea, 1998. White Paper on Fair Pricing for Transport Infrastructure Use. Brussels.
- D'Acierno L., Gallo M., Montella B., 2006. "Optimisation models for the urban parking pricing problem". *Transport Policy* 13, pp.34-38.
- D'Acierno L., Montella B., Gallo M., 2002. Multimodal assignment to congested networks: fixed-point models and algorithms. Proceedings of PTRC 2002 "European Transport Conference 2002", Cambridge (UK) 9-11 September 2002.
- D'Acierno L., Gallo M., Montella B., 2005. "Proprietà teoriche dei modelli di assegnazione multimodale nel caso di funzioni di costo non separabili". In "Metodi e tecnologie dell'ingegneria dei trasporti – Seminario 2002", a cura di Cantarella G.E. e Russo F., Franco Angeli Editore, 2005, pp. 414-427.
- Dafermos S. C., 1973. "Toll patterns for multiclass-users transportation networks". *Transportation Science* 7, pp 211-223.
- Dafermos, S. C., Sparrow, F. T., 1969. "The traffic assignment problem for a general network". *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 73B, pp. 91-118.
- Dafermos S. C., Sparrow F.T., 1971 "Optimal resource allocation and toll patterns in user optimized transport network". *Journal of Transport Economics and Policy* 5, pp 198-200.
- Daganzo C.F, 1977a. "On the traffic assignment problem with flow depend costs". *Transportation Research* 11, pp. 433-437.

- Daganzo C.F, 1977b. "On the traffic assignment problem with flow depend costs". *Transportation Research* 11, pp. 439-441.
- de Palma A., Lindsey R., 2006. "Modelling and evaluation of road pricing in Paris". *Transport Policy* 13, pp. 115-126.
- de Palma A., Lindsey R., Proost S., 2006. "Research challenges in modelling urban road: an overview". *Transport Policy* 13, pp. 97-105.
- DETR, Department of the Environment, Transport and the Regions, 1998a. A new Deal for Transport: Better for Everyone-The Government's White Paper on the Future of Transport, Cm 350, London. The Stationary Office.
- DETR, Department of the Environment, Transport and the Regions, 1998b. Breaking the Logjam-The Government's consultation paper on fighting traffic congestion and pollution through road user and workplace parking charges, London. The Stationary Office.
- Dial R.B., 1996a. "Bicriterion traffic assignment: basic theory and elementary algorithms". *Transportation Science* 30, pp. 93-111.
- Dial R.B., 1996b. "Bicriterion traffic assignment: efficient algorithms plus examples". *Transportation Research* 31B, pp. 357-359.
- Dial R.B., 1999a. "Network-optimized road pricing: Part I: A parable and a model". *Operations Research* 47, pp. 54-64.
- Dial R.B., 1999b. "Network-optimized road pricing: Part II: Algorithms and Examples". *Operations Research* 47, pp. 54-64.
- Dial R.B., 1999c. "Minimal-revenue congestion pricing part I: A fast algorithm for the single-origin case". *Transportation Research A* 33, pp. 189-202.
- Dial R.B., 2000 "Minimal-revenue congestion pricing part II: A efficient algorithm for the general case". *Transportation Research A* 34, pp. 645-665.
- Dimitriou L., Tsekeris T., 2009. "Evolutionary game-theoretic model for dynamic congestion pricing in multi-class traffic networks". *Netnomics* 10, pp. 103-121.
- Emmerink R.H.M., Nijkamp P., Rietveld P., 1995. "Is congestion pricing a first-best strategy in transport policy? A critical review of arguments". *Environment and Planning B* 22, pp. 581-602.
- Ekström J., Engelson L., Rydergren C., 2009. "Heuristic algorithms for a second-best congestion pricing problem". *Netnomics* 10, pp. 85-102.
- Eliasson J., 2008. "Lessons from the Stockholm congestion charging trial". *Transport Policy* 15, pp. 395-404.
- Eliasson J., 2009. "A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system". *Transportation Research A* 43, pp. 468-480.

- Eliasson J., Hultkrantz L., Nerhagen L., Smidfelt Rosqvist L., 2009. "The Stockholm congestion – charging trial 2006: Overview of effects". *Transportation Research A* 43, pp. 240–250.
- Evans A.W., (1992) "Road congestion pricing: when is it a good policy?". *Journal of Transport Economics and Policy* 26, pp.213-243.
- Farrella S., Saleh W., 2005. "Road-user charging and the modelling of revenue allocation". *Transport Policy* 12, pp. 431-442.
- Ferrari P., 1995. "Road pricing and network equilibrium". *Transportation Research B* 29, pp. 357-372.
- Ferrari P., 1997. "Capacity constraints in urban transport networks". *Transportation Research B* 31, pp. 201-301.
- Ferrari P., 1999. "A model of urban transport management". *Transportation Research B* 33, pp. 43-46.
- Ferrari P., 2002. "Road network toll and social welfare". *Transportation Research B* 36, pp. 471-483.
- Ferrari P., 2005. "Road Pricing and users'surplus". *Transport Policy* 12, pp. 477-487.
- Ferrari P., 2006. "Il finanziamento del trasporto pubblico mediante road pricing". *Trasporti & territorio* 2, pp. 67-75.
- Ferrari P., 2007. "Modifiche nella ripartizione della domanda di trasporto fra i diversi gruppi sociali prodotte dal road pricing". *Trasporti & territorio* 2, pp. 73-81.
- Gallo M., 2006. "Una stima dei costi esterni dei sistemi di trasporto in Regione Campania". In *"Trasformazioni, coesioni, sviluppo territoriale. Temi emergenti nelle scienze regionali"*, a cura di G. Brunetta e R. Fistola, vol. 1390.38, Franco Angeli Editore, Milano, pp. 265-284.
- Gallo, 2007. "I costi esterni della mobilità: tipologie e metodi di stima". *TeMA* n. 0, pp. 59-63.
- Gentile G., Papola N., Persia L., 2005. "Advanced pricing and rationing policies for large scale multimodal networks". *Transportation Research A* 36, pp.612-631.
- Giuliano G., 1992. "An assessment of the political acceptability of congestion pricing". *Transportation* 19, pp. 335-358.
- Glazer A., Niskanen E., 2005. "When users of congested roads may view tolls as unjust". *European Transport* 31, pp. 6-14.
- Government Office for London, 1995. The London Congestion Charging Research Programme, HMSO London.
- Government Office for London, 2000. Road Charging Options for London: A Technical Assessment.
- Gudmundsson H., Ericsson E., Beser Hugosson M., Smidfelt Rosqvist L.,

2009. "Framing the role of Decision Support in the case of Stockholm Congestion Charging Trial". *Transportation Research A* 43, pp. 258–268.
- Hamdouch Y., Florian M., Hearn D.W., Lawphongpanich S., 2007. "congestion pricing for multi-modal transportation system". *Transportatio Research B* 41, pp. 275-291.
- Hearn D., Ramana M.V., 1998. "Solving congestion toll-pricing models". In: Marcotte P and Nguyens S (Eds) *Equilibrium and Advanced Transportation Modelling*, Kluwer Academic Publishers, Dorderecht, p. 109-114.
- Hearn D.W., Ribera J., 1980. "Bounded flow equilibrium problems by penalty methods". *Proceedins of 1980 IEEE International Conference on circuits and Computers*, pp. 162-166.
- Hearn D.W., Yldirim M.B., 2002. "A toll pricing framework for traffic assignment problems with elastic demand". In: Gendreau M., Marcotte P., (Eds). *Transportation and Network Analysis: Current Trends*. Kluwer Academic Publisher, pp. 135-145.
- Hearn D.W., Yildirim M.B., Ramana M.V., Bai L.H., 2001. "Computational methods for congestion toll pricing models". *The 4th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- HMG, Her Majesty's Government, 1999. *The Greater London Transport Act*. Stationary Office.
- HMG, Her Majesty's Government, 2000. *Transport Act 2000*. Stationary Office.
- Ieromonachou P, Potter S, Warren J.P., 2006. "Norway's urban toll ring: evolving towards congestion charging?". *Transport Policy* 13, pp. 367-378.
- Ieromonachou P., Potter S., Warren J.P., 2007a. "A strategic niche analysis of urban road pricing in the UK and Norway". *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 7, pp. 15-38.
- Ieromonachou P, Potter S, Warren J.P., 2007b. "Supporting Policy Packages: the future of road pricing in the UK?". *Proceedings of the 4th International Kuhmo-NectarC2 Conference "Pricing, Financing, Regulating Transport Infrastructures and Services"*, Urbino, July 2007.
- International Road Federation, (2000) *World Road Statistics 2000*. IRF, Geneva.
- Ison S., 2000. "Local authority and academic attitudes to urban road pricing: a UK perspective". *Transport Policy* 7, pp. 269-277.
- Jakobsson C., Fujii S., Gärling T., 2000. "Determinants of private car users' acceptance of road pricing". *Transport Policy* 7, pp. 153–158.
- Kendall D.G., 1951. "Some problems in the theory of queues". *Journal of the Royal Statistical Society XIII B*, pp. 151-158.

- Keong C. K., 2002. "Road Pricing: Singapore's Experience". 3th Seminar of the IMPRINT-EUROPE Thematic Network: "Implementation Reform on Transport Pricing: Constraints and solution: learning from best practice", Brussels, 23rd-24th October 2002.
- King D., Manville M., Shoup D., 2007. "The political calculus of congestion pricing". *Transport Policy* 14, pp. 111-123.
- Knight F.H., American Economic Association, Readings in Price Theory, Chicago: Richard D. Irwin, Inc.; 1952, pp. 160-179.
- Koh E., Shepherd S., Sumalee A., 2009. "Second best toll and capacity optimisation in networks: solution algorithm and policy implications". *Transportation* 36, pp. 147-165.
- Kottenhoff K., Brundell Freij K., 2009. "The role of public transport for feasibility and acceptability of congestion charging – The case of Stockholm". *Transportation Research A* 43, pp. 297-305.
- Kuhn H.W., Tucker A. W., 1951. "Nonlinear Programming", in: J. Neyman (ed) *Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, University of California Press, Berkeley.
- Kuwahara M., 2007. "A theory and implications on dynamic marginal cost". *Transportation Research A* 41, 627-643.
- Larson T., Patriksson M., 1995. "An augmented lagrangian dual algorithm for link capacity side constrained traffic assignment problems". *Transportation Research B* 29, pp. 433-445.
- Larson T., Patriksson M., 1998. "Side constrained toll pricing models-traffic management through link tolls". In: Marcotte P., Nguyen S. (Eds), *Equilibrium and Advanced Transportation Modeling*. Kluwer, Dordrecht, pp. 125-151.
- Lawphongpanich S., Hearn D.W., 2004. "An MPEC approach to second-best toll pricing". *Mathematical Programming* 101, pp. 33-55.
- Levinson D., 2005. "Micro-foundations of congestion and pricing: A game theory perspective". *Transportation Research A* 39, pp. 691-704.
- Litman, T., 2003. "The Online TDM Encyclopedia: mobility management information gateway". *Transport Policy* 10, pp: 245-249.
- Lo H.K., Szeto W.Y., 2005. "Road pricing modeling for hyper-congestion". *Transportation Research A* 39, pp. 715-722.
- Maher M., Stewart K., Andrea Rosa. "Stochastic social optimum traffic assignment". *Transportation Research B* 39, pp. 753-767.
- Menon A.P.G., (2000) "ERP in Singapore—a perspective one year on". *Traffic Engineering and Control* 41 (2), pp. 40-45.
- Montella B., Gallo M., D'Acierno L., 2001. "Un modello di assegnazione multimodale su iperrete per la simulazione degli spostamenti di tipo Park and Ride". In *"Metodi e modelli per il trasporto pubblico"*

- locale*", a cura di Podestà C. e Maja R., Franco Angeli Editore, 2001, pp. 175-197.
- Nash C., 2003. "Marginal cost and other pricing principles for user charging in transport: a comment". *Transport Policy* 10, pp. 345-348.
- Oberholzer-Gee F., Weck-Hannemann H., 2001. "Pricing road use: politico-economic and fairness considerations". *Transportation Research D* 7, pp. 357-371
- Odeck J., Bråten S., 2008. "Travel Demand elasticities and users attitudes: A case study of Norwegian toll projects", *Transportation Research A* 42, pp. 77-94.
- Olszewski P., Xie L., 2005. "Modelling the effects of road pricing on traffic in Singapore", *Transportation Research A* 39, pp. 755-772.
- O_Mahony M., Geraghty D., Humphreys I., 2000. "Potential response to road user charging in Dublin, Ireland". *Transportation Research Record* 1732, pp. 50-54.
- Oslopakke 1: Oslo Transport Package, 1990-2007. Norwegian Public Roads Administration and Norwegian National Rail Administration.
- Oslopakke 2: A Common Strategy for better Public Transport in Oslo and Akershus, 2001-2011. Norwegian Public Roads Administration and Norwegian National Rail Administration, Grytting AS, June 2002.
- Papageorgiou M., Blosseville J.M., Hadj Salem H., 1990. "Modeling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Péripherique in Paris-part I: modeling." *Transportation Research A* 24, 345-359.
- Parry W.H., Bento A., 2001. "Revenue recycling and welfare effects of road pricing". *Scandinavian Journal of Economics* 103, pp. 645-671.
- Pas E.I., Principio S.N., 1997. "Braess' Paradox: some new insights".
- Payne H., Thomson W. A., 1975. "Traffic Assignment on transportation networks with capacity constraints and queueing", the 47th National ORSA/TIMS North American Meeting, Chicago, IL.
- Pigou A.C., 1920. *"The Economics of Welfare"*, MacMillan London.
- Polak J., Jones P.M., Vythoulkas P.C., Meland S., Tretvik T., 1991. "The Trondheim toll ring: Results of a static preference study of travellers responses". Transport Studies Unit, University of Oxford.
- Prashker J.N., Bekhor S., (2000). "Some observations on stochastic user equilibrium and system optimum of traffic assignment". *Transportation Research B* 34, pp. 277-291.
- Prud'homme R., Bocarejo J.P., 2005. "The London congestion charge: a tentative economic appraisal". *Transport Policy* 12, pp. 279-287.
- Proost S., Sen A., 2006. "Urban transport pricing reform with two levels of government: a case study of Brussels". *Transport Policy* 13, pp.

127-139.

- Proost S., Van Dender K., Courcelle C., De Borger B., Peirson J., Sharp D., Vicherman R., Gibbons E., O'Mahoney M., Heaney Q., Van De Bergh J., Verohef E., 2002. "How large is the gap between present and efficient transport prices in Europe?". *Transport Policy* 9, pp. 41-57.
- Rothengatter W., 2003. "How good is first best? Marginal cost and other pricing principles for user charging in transport". *Transport Policy* 10, pp. 121-130.
- Rouwendaal J., Veroef E.T., 2006. "Basic economic principles of road pricing: From theory to applications". *Transport Policy* 13, pp. 106-114.
- Runhaar H., 2001. "Efficient Pricing Transport". *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 1, pp. 29-44.
- Santos G., 2007. "The London Congestion Charging Scheme: the experience so far". Proceedings of 11th World Conference on Transport Research, Berkeley, June 2007.
- Schade J., Schlag B., 2003. "Acceptability of urban transport pricing strategies". *Transportation Research F* 6, pp. 45-61.
- Sheffy Y., 1985. *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York.
- Small K., 1992. "Using the revenues from congestion pricing". *Transportation* 19, pp. 359-381.
- Smeed R. J., 1964. Ministry of Transport: Road Pricing- The Economic and Technical Possibilities, Panel Report, London, HMSO.
- Smith M. J., 1979. "The existence, uniqueness and stability of traffic equilibria". *Transportation Research B* 13, pp. 295-304.
- Smith M. J., 1987. "Traffic control and traffic assignment in a signal-controlled network with queueing". Proceedings of the 10th Symposium on Transportation and Traffic Theory, pp. 61-77. MIT Press.
- Stewart K.J., 2007. "Tolling traffic links under stochastic assignment: Modelling the relationship between the number and price level of tolled links and optimal traffic flows". *Transportation Research A* 41, pp. 644-654.
- Thorpe N., Hills P., Jaensirisak S., 2000. "Public attitudes to TDM measures: a comparative study". *Transport Policy* 7, pp. 243-257.
- Transport For London, 2004. "Central London Congestion Charging: Impacts Monitoring, Second Annual Report".
- Transport For London, 2007a. "Central London Congestion Charging: ex-post evaluation of the quantified impacts of the original scheme".

- Transport For London, 2007b. "Central London Congestion Charging: Impacts Monitoring, Fifth Annual Report".
- Transport for London, 2008. "Central London Congestion Charging: Impacts Monitoring, Sixth Annual Report".
- Tretvik T., 2003. Norway's toll rings: full scale implementations of urban pricing. In: SINTEF—engineering and consultancy, presented on 16–17 October, Budapest University of Technology and Economics.
- Ubbels B., Veroef E.T., 2005. "Acceptability of road pricing and revenue use in the Netherlands". *European Transport* 32, pp. 69-94.
- Vägverket, 2006. Trial Implementation of a Congestion Tax in Stockholm, 3 January – 31 July 2006.
- Veroef E.T., 2000. "The implementation of marginal external cost pricing in road transport". *Regional Science* 79, pp. 307-332.
- Veroef E.T., 2002a. "Second-best congestion pricing in general networks. Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points". *Transportation Research A* 36, pp. 707-729.
- Veroef E.T., 2002b. "Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands". *Regional Science and Urban Economics* 32, pp. 281–310.
- Verhoef E.T., Emmerink M.H.R., Nijkamp P., Rietveld P., 1996a. "Information provision, flat and fine congestion tolling and the efficiency of road usage". *Regional Science and Urban Economics* 26, pp. 505-529.
- Verhoef E.T., Nijkamp P., Rietveld P., 1996b. "Second-best congestion pricing: the case of an untolled alternative". *Journal of Urban Economics* 40, pp. 279-302.
- Vold A., 2006. "Phased implementation of transport pricing for Greater Oslo". *Transport Policy* 13, pp. 140-148.
- Wardrop J.G., 1952. "Some theoretical aspects of road traffic research". Proceedings of the Institute of Civil engineers, Part II 1, pp. 325-328.
- Webster F.V., 1958. "Traffic signal settings". Road research Technical Paper 39. Her Majesty's Stationary Office. London.
- Yang H., 1999. "System Optimum, stochastic user equilibrium, and optimal link tolls". *Transportation Science* 33, pp. 354-360.
- Yang H., Bell M.G.H., 1997. "Traffic restraint, road pricing and network equilibrium". *Transportation Research B* 31, pp. 303-314.
- Yang H., Huang H.J., 2004. "The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and systems optimum problem". *Transportation Research Part B* 38, pp.1-15.
- Yang H., Tang W.H., Cheung W.M., Meng Q., 2002. "Profitability and welfare gain of private toll roads with heterogeneous users".

Transportation Research A 36, pp. 537–554.

Yang H., Yagar S., 1994. "Traffic assignment and traffic control in general freeway-arterial corridor systems". *Transportation Research B* 28, pp. 463-486.

Yang H., Zhang X., 2008. "Existence of anonymous link tolls for system optimum on networks with mixed equilibrium behaviors". *Transportation Research B* 42, pp. 99-12.

Yildirim M.B., Hearn D.W., 2005. "A first best toll pricing framework for variable demand traffic assignment problems". *Transportation Research B* 39, pp. 659-678.

Zhang, H.M., Ge, Y.E., 2000. "Equilibrium traffic assignment under road pricing and multiple information sources". Working Paper, University of California at Davis, CA.

Zhang H.M., Ge Y.E., 2004. "Modeling variable demand equilibrium under second-best road pricing". *Transportation Research B* 38, pp. 733-749.

Per la descrizione dei sistemi di pricing riportati nel capitolo 2 si è fatto, inoltre, riferimento ai seguenti siti ufficiali:

Singapore

Land Transport Authority:

<http://www.lta.gov.sg/>

Norvegia

Norwegian Public Road Administration:

<http://www.vegvesen.no/en/The+NPR>

Regno Unito

Transport for London:

<http://www.tfl.gov.uk/>

Department for Transport:

<http://www.dft.gov.uk/>

Svezia:

Vägarverket-Swedish National Road Administration:

<http://www.vv.se/>

Swedish Transport Agency:

<http://www.transportstyrelsen.se/en/>

Italia

Comune di Milano:

<http://www.comune.milano.it/>

Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente

<http://www.ama-mi.it/>